

2
Lej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"ANALISIS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO
SOBRE LA TRAZA DE LA AUTOPISTA LA
VENTA-LECHERIA, EMPLEANDO PERCEPCION
REMOTA"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO TOPOGRAFO Y GEODESTA

P R E S E N T A :

CARLOS VELAZQUEZ PERALTA



DIRECTOR DE TESIS: M.C. CLEMENCIA SANTOS CERQUERA

MEXICO, D. F.

1999

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

273567



Universidad Nacional
Autónoma de México

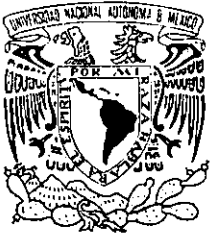


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-167/96

Señor
CARLOS VELAZQUEZ PERALTA
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora **M. C. CLEMENCIA SANTOS CERQUERA**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO TOPOGRAFO Y GEODESTA**.

"ANALISIS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO SOBRE LA TRAZA DE LA AUTOPISTA LA VENTA-LECHERIA, EMPLEANDO PERCEPCION REMOTA"

INTRODUCCION.

- I. ANTECEDENTES HISTORICOS**
 - II. METODOLOGIA PARA EL ANALISIS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO**
 - III. TECNICAS PARA EVALUACION DEL IMPACTO DE OBRAS DE INFRAESTRUCTURA CARRETERA**
 - IV. ANALISIS DE RESULTADOS**
 - V. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS**
- BIBLIOGRAFIA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 20 de febrero de 1997.
EL DIRECTOR


ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/GMP*lmf

ÍNDICE

Objetivos.....	1
Introducción.....	2
CAPITULO I.- ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	5
1.1.- Localización de la zona en estudio.....	5
1.2.- Entidades afectadas por el trazo de la autopista.....	8
1.2.1.- Cuajimalpa de Morelos.....	9
1.2.2.- Huixquilucan.....	12
1.2.3.- Naucalpan de Juarez.....	14
1.2.4.- Atizapan de Zaragoza.....	17
1.2.5.- Cuautitlán Izcalli.....	19
CAPITULO II.- METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO.....	22
2.1.- Búsqueda y selección del material a procesar.....	24
2.1.1.- Cartografía de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).....	24
2.1.2.- Fotografías aéreas de la zona poniente de la Ciudad de México.....	26
2.1.3.- Imagen SPOT P. de la zona poniente de la Ciudad de México.....	29
2.1.4.- Imagen LANDSAT TM de la Ciudad de México.....	33
2.2.- Software para el procesamiento digital de imágenes empleado.....	36
2.2.1.- Software básico.....	36
2.2.2.- Algunos software de aplicación.....	40
2.3.- Definición del Sistema de Información Geográfico (SIG).....	41
2.4.- Captura de la información.....	44
2.4.1.- Vía Scanner.....	45
2.4.2.- Por Tableta digitalizadora.....	45
2.4.3.- Por computadora.....	46
2.5.- Procesamiento digital de imágenes.....	46
2.5.1.- Filtros.....	48
2.5.1.1.- Filtros pasa-bajas.....	49
2.5.1.2.- Filtros pasa-altas.....	50
2.5.1.3.- Otros tipos de filtros.....	51
2.5.2.- Realces.....	53

2.5.3.- Transformaciones.....	54
2.5.3.1.- Transformación HSI.....	54
2.5.3.2.- Transformación a componentes principales.....	55
2.5.4.- Correcciones radiométricas.....	55
2.5.4.1.- Restauración de líneas o píxeles perdidos.....	56
2.5.4.2.- Corrección por bandeado de la imagen.....	56
2.5.4.3.- Corrección atmosférica.....	57
2.5.4.4.- Corrección geométrica o georreferenciación.....	58
2.5.5.- Clasificación digital de imágenes.....	62
2.5.5.1.- Reconocimiento de patrones.....	63
2.5.5.2.- Clasificación no supervisada.....	64
2.5.5.3.- Clasificación supervisada.....	67
2.5.5.4.- Métodos de muestreo para la verificación de los datos.....	70
2.6.- Técnicas de fotointerpretación en Fotografías aéreas.....	72
2.6.1.- Textura.....	72
2.6.2.- Tono.....	73
2.6.3.- Color.....	73
2.6.4.- Formas.....	75
2.6.5.- Otras técnicas.....	75
CAPITULO III.- TÉCNICAS PARA EVALUACIÓN DE OBRAS DE INFRAESTRUCTURA CARRETERA.....	76
3.1.- Definición de la zona en estudio.....	79
3.2.- Búsqueda y captura de la información.....	79
3.3.- Selección del SIG y del software para el procesamiento digital de imágenes.....	82
3.4.- Captura de la información.....	83
3.5.- Procesamiento digital.....	84
3.5.1.- Secuencia metodológica.....	85
3.6.- Obtención de mapas preliminares y análisis de los mismos.....	92
3.6.1.- Mapa de Uso de Suelo.....	92
3.6.2.- Mapa de Uso de Suelo con vías principales (1984).....	96
3.6.3.- Mapa de Uso de Suelo con vías principales (1995).....	97
3.6.4.- Análisis de los mapas preliminares.....	98

3.6.5.- Mapa de modificación de Uso de suelo.....	102
3.6.6.- Mapa de tipo de cambio de Uso de Suelo.....	102
CAPITULO IV.- ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	104
4.1.- Resultados de los procesos digitales.....	104
4.2.- Detección de tipos de cambio en la zona de estudio.....	105
4.3.- Elaboración y verificación de mapas finales.....	107
4.3.1.- Elaboración de mapas finales.....	107
4.3.2.- Verificación de mapas finales.....	108
CAPITULO V.- CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....	117
5.1.- De la metodología.....	117
5.2.- De los procesos digitales.....	117
5.3.- De la aplicación al estudio de caso.....	121
ANEXO (ILUSTRACIONES DEL PROYECTO).....	122
BIBLIOGRAFIA (REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS).....	123

DEDICATORIAS

A mi madre; por la paciencia que me tuviste desde niño, por estar siempre a mi lado y por que gracias a ti continúe mis estudios universitarios. A ti con gran cariño, agradecimiento y respeto te dedico especialmente este trabajo.

A la memoria de mi padre; por el gran ejemplo que me diste, a ti estés donde estés te dedico especialmente este trabajo.

A mis hijos; Mayra I. y Carlos A. para que les sirva de estímulo y que cada día se preparen más y mejor para un futuro de mayores oportunidades.

A Gel por su cariño, compañía y motivación para seguir adelante.

A Tere, Juan, Olivia y Martha; por compartir tristezas y alegrías, éxitos y fracasos, por todos esos detalles que me han brindado durante mi vida como persona y como estudiante.

Al Instituto Nacional de Estadística Geografía, e Informática por haber contribuido de manera fundamental en mi formación profesional dentro de esta institución.

A quienes con su confianza, cariño y apoyo, sin escatimar esfuerzo alguno, me han brindado su apoyo incondicional, ayudándome a lograr una meta más; mi título profesional.

Gracias.

Que nadie pretenda llamarse a engaños. no estudiamos con el propósito de acumular conocimientos estáticos y sin contenido humano. nuestra causa como estudiantes es el conocimiento militante, el conocimiento crítico que impugna, contradice, controvierte, refuta y transforma, revoluciona la realidad social, política, cultural y científica.

José Revueltas

OBJETIVOS

Diseñar una metodología en donde se apliquen las técnicas del procesamiento digital de imágenes para el análisis del cambio de Uso de Suelo, ocasionado por la construcción de la autopista La Venta-Lechería y lograr su representación gráfica y digital.

Objetivos específicos

- Obtener a partir de la manipulación de imágenes de satélite y de técnicas metodológicas la discriminación de las diferentes cubiertas del suelo y elementos para evidenciar su localización, todo con el fin de actualizar la modificación del Uso del Suelo sobre la traza de la autopista La Venta-Lechería.
- Diseñar una metodología que permita estudiar los cambios producidos por la construcción de la autopista La Venta-Lechería.
- Estudiar las modificaciones en el uso del suelo sobre la traza de la nueva autopista La Venta-Lechería aplicando las técnicas de Percepción Remota para desarrollar la metodología propuesta.
- Afianzar las aplicaciones en Percepción Remota, mediante la interrelación de las variables de tipo espacial y social.
- Mostrar los principales procesos digitales que se le aplican a las diferentes imágenes, para realizar una clasificación automatizada.
- Obtener una representación cartográfica de la afectación y modificación del suelo por desarrollos de nuevos ejes viales.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la cartografía de cualquier país requiere de una actualización constante que permita constituirlo como un documento gráfico veraz y confiable, para ello es necesario apoyarse en insumos que nos permitan definir inequívocamente y con precisión la posición de las distintas cubiertas y detalles de interés que se presentan en las cartas y mapas. Este conocimiento constituye la base fundamental para la planeación y estrategia de crecimiento de una nación.

En los tiempos actuales, con el desarrollo de los Sistemas de Cartografía asistidos por Computadora (CAD); la Percepción Remota (PR), y los Sistemas de Administración de base de datos, todos ellos asociados a los modernos Sistemas de Información Geográfica (SIG); dan la posibilidad de tener nuevas alternativas de solución con mayor calidad y en menor tiempo.

A lo largo de la historia de México se han llevado a efecto diversos trabajos orientados a determinar la forma y dimensiones del territorio nacional, cuya expresión se materializa en la construcción de documentos cartográficos en diferentes escalas; al principio con procedimientos topográficos y geodésicos, posteriormente y en gran escala se han utilizado fotografías aéreas tanto para su construcción inicial como para su actualización. Con el desarrollo de las técnicas y tecnologías actuales se han podido integrar a este proceso imágenes captadas por sensores no fotográficos situados en plataformas satelitarias.

El requerimiento creciente de este tipo de información impuestas por el desarrollo del país, asociado ha esto a la necesaria planeación del mismo, determinan la necesidad de contar con cartografía topográfica y temática actualizada para el buen desarrollo del país.

Entre las aplicaciones más frecuentes del procesamiento digital de imágenes de satélite se encuentra la generación de la cartografía temática relacionada con la identificación y estado

fenológico de las diferentes cubiertas del terreno (Uso de suelo y vegetación).

En el análisis digital se crean campos de entrenamiento de las diferentes cubiertas que son de interés en la imagen, se realizan clasificaciones espectrales mediante el método no supervisado y posteriormente el supervisado, por el algoritmo de máxima verosimilitud.

En donde las cubiertas son diferenciadas de acuerdo a su respuesta espectral en las distintas porciones del espectro electromagnético, y clasificadas a partir de sus afinidades. De esta manera, se definen clases espectrales en donde existe una correspondiente relación, que identifica cubiertas u objetos contenidos en un rango del espectro electromagnético. Si bien desde el punto de vista teórico este proceso parece bastante sencillo, existen varios problemas en la práctica (la confusión de respuestas espectrales, que se debe principalmente a la variabilidad de cubiertas a distinguir, tiempo de procesos).

Así, por ejemplo objetos diferentes pueden poseer la misma o muy parecida respuesta espectral, igualmente un objeto puede tener una respuesta espectral variada, con lo cual una clase de información individual o atributo, puede corresponder a diferentes clases espectrales.

Lo anterior introduce, confusión en los resultados obtenidos en una clasificación espectral, ya sea no supervisada o supervisada, este tipo de confusión se reduce substancialmente obteniendo campos de entrenamientos (clusters) en áreas homogéneas y apoyándonos en la verificación de campo con fotografías aéreas.

Por otro parte, la interpretación visual en imágenes mejoradas por ejemplo; los compuestos en color rojo, verde y azul (por sus siglas en inglés, Red, Green y Blue: RGB), las imágenes obtenidas con procedimientos estadísticos como análisis de componentes principales o bien cocientes de bandas, conocido comúnmente como Índice de Vegetación Normalizado (IVN) y la obtención de un producto híbrido en donde se fusiona la imagen SPOT (*Systeme*

Probatoire d' Observation de la Terre) Pancromática (10 m) y LANDSAT (llamado en su inicio *ERST*, se desarrollo con el objetivo de permitir la adquisición de datos espaciales, espectrales y temporales de la superficie de la tierra en forma global y repetitiva). TM (30 m), con esta fusión obtendremos un producto híbrido que tiene la característica espacial de la imagen SPOT y al mismo tiempo conserva las características radiométricas de la imagen LANDSAT, posteriormente se aplican realces y filtrados direccionales para mejorar la calidad de la imagen. Los resultados de ambos análisis se sobreponen al mapa base. estas técnicas nos permiten obtener resultados superiores a los obtenidos en el análisis digital.

En este proyecto se desarrolla una metodología en donde se aplican las técnicas del procesamiento digital de imágenes para el análisis del cambio de Uso de Suelo, ocasionado por la construcción de la autopista La Venta-Lechería y se logra la representación (gráfica y digital) de la zona estudiada.

Para cumplir con los objetivos planteados, el presente trabajo se divide en cinco capítulos, que a continuación se resumen:

En el capítulo I se hace una pequeña descripción de aspectos físicos e históricos de la entidades por donde pasa la vía, esto con el fin de tener una visión preliminar de la zona estudiada. En el capítulo II se diseña la metodología que se aplica en el estudio de caso, también se presenta una introducción de las componentes de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el procesamiento digital de imágenes en Percepción Remota. En el capítulo III se realiza la aplicación de la metodología al estudio de cambio ocasionado por la construcción de la nueva autopista La Venta-Lechería, obteniendo una serie de mapas preliminares para su posterior análisis, para posteriormente elaborar los mapas finales. En el capítulo IV se analizan los resultados de los procesos digitales y la detección de los cambios en la zona de estudio. Y por último en el capítulo V se hacen las conclusiones y se realizan algunos comentarios del diseño del diseño metodológico empleado, de los procesos digitales y de su aplicación.

CAPITULO I.- ANTECEDENTES HISTÓRICOS

1.1.- Localización de la zona en Estudio

La zona en estudio se ubica entre las coordenadas extremas de los 19° 15' a los 19° 37' de latitud norte y a los 99° 12' a 99° 21' de longitud oeste de Greenwich, su posición esta enclavada en la zona poniente del D.F y cubre un área de 900 km² aproximadamente. Para el análisis preliminar de la zona se describen algunos aspectos físicos, biológicos y culturales.

Se recurrió al siguiente material: Cartas de uso del suelo, topográficas y de uso potencial del suelo, escala 1:50, 000 (INEGI, 1970), atlas de la ciudad de México (D.D.F. y Colegio de México 1987), cuadernillos delegacionales y municipales (INEGI, 1997).

El área en estudio comprende cuatro municipios conurbados (Huixquilucan, Naucalpan, Atizapan de Zaragoza y Cuautitlán Izcalli) de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCD) y una delegación del D.F. (Cuajimalpa de Morelos), cuya infraestructura vial y de servicios de transporte tiene una gran vinculación e interacción con el sistema de transporte del Distrito Federal (Ver figura 1).

Anteriormente las únicas vías estructuradas a nivel metropolitano eran las autopistas de acceso México-Toluca y México-Queretaro con su prolongación urbana (Periférico, Vallejo, Reforma y Constituyentes), dado que las demás arterias con las que se contaba, carecían de las características adecuadas para facilitar el tránsito, esto ocasionaba un congestionamiento vial sobre estas arterias.

La vegetación predominante en la zona es el bosque de pino-encino, y se localiza principalmente en los parques nacionales del Desierto de los Leones y el Parque Miguel Hidalgo y Costilla.



Figura 1.- Ubicación de la zona en estudio

La densidad poblacional en el D.F. y la zona conurbada, de acuerdo al XI censo general de población y vivienda de 1990, es de más de 5000 habitantes por km^2 , esto es, en una zona muy pequeña, con una densidad elevada de población.

Áreas verdes afectadas por la vía.- La superficie ocupada por las distintas áreas verdes en cada uno de los municipios y en la delegación de Cuajimalpa, por donde pasa la nueva autopista La Venta - Lechería, se encuentran dentro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), esta vía permitirá disminuir el congestionamiento vehicular en la zona (debido a que constituye uno de los mayores centros urbanos del mundo), pero se creará otro, que es la disminución de las áreas verdes tanto de esparcimiento como de cultivo a lo largo de la traza de la autopista.

Las localidades por donde pasa la vía se encuentran en dos sectores de áreas verdes en los que se divide la ZMCM, las cuales son el sector oeste-suroeste y el sector norte.

- El sector oeste-suroeste está constituido por las delegaciones Miguel Hidalgo, Cuajimalpa, Magdalena Contreras, parte de Alvaro Obregón y el municipio de Huixquilucan. Los suelos de esta zona son simipermeables de tipo andosol en las laderas, feozen dúrico (tepetate) y litosol (pedregal) en las partes bajas. La precipitación va de los 800 a 1200 mm. Además este sector cuenta con un alto índice de áreas verdes, pues en este se localizan los tres parques de reserva ecológica con que cuenta actualmente el Distrito Federal, los cuales son; el Ajusco, el parque del Desierto de los Leones y el parque nacional Miguel Hidalgo y Costilla anteriormente llamado la Marquesa, además de contar con terrenos para agricultura de temporal (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 7).

En el sector anterior la superficie de parques y jardines es mucho mayor que el de los camellones y glorietas, tiene la mayor superficie relativa de las áreas verdes de toda la ZMCM. Con la puesta en marcha de la autopista La Venta-Lechería, la zona tenderá a disminuir considerablemente las áreas verdes, debido al aumento poblacional a lo largo de la vía.

- En el sector norte se incluyen los municipios de Cuautitlán, Cuautitlán Izcalli, Tultitlán, Coacalco, Tecóman y parte del municipio de Ecatepec. Los suelos de esta zona son simipermeables de tipo feozen dúrico (tepetate), litosol (pedregal), luvisol y combisol. La precipitación anual es cercana a los 700 mm, una gran parte de este sector está sometido a uso agrícola, aunque en la actualidad está disminuyendo considerablemente, debido a la creación de unidades habitacionales. Mientras que otra parte es tierra ociosa, erosionada, con cubierta de vegetación herbácea.

Además en este sector se ubica gran parte del desarrollo industrial de toda la zona conurbada, con lo que se presenta un congestionamiento vehicular.

1.2.- Entidades afectadas por el trazo de la autopista

La traza de la autopista cruza la zona poniente de la Ciudad de México (Cuajimalpa de Morelos) y cuatro municipios del Estado de México de los que conforman la ZMCM (Huixquilucan, Naucalpan, Atizapan de Zaragoza y Cuautitlán Izcalli) (Ver figura 2).

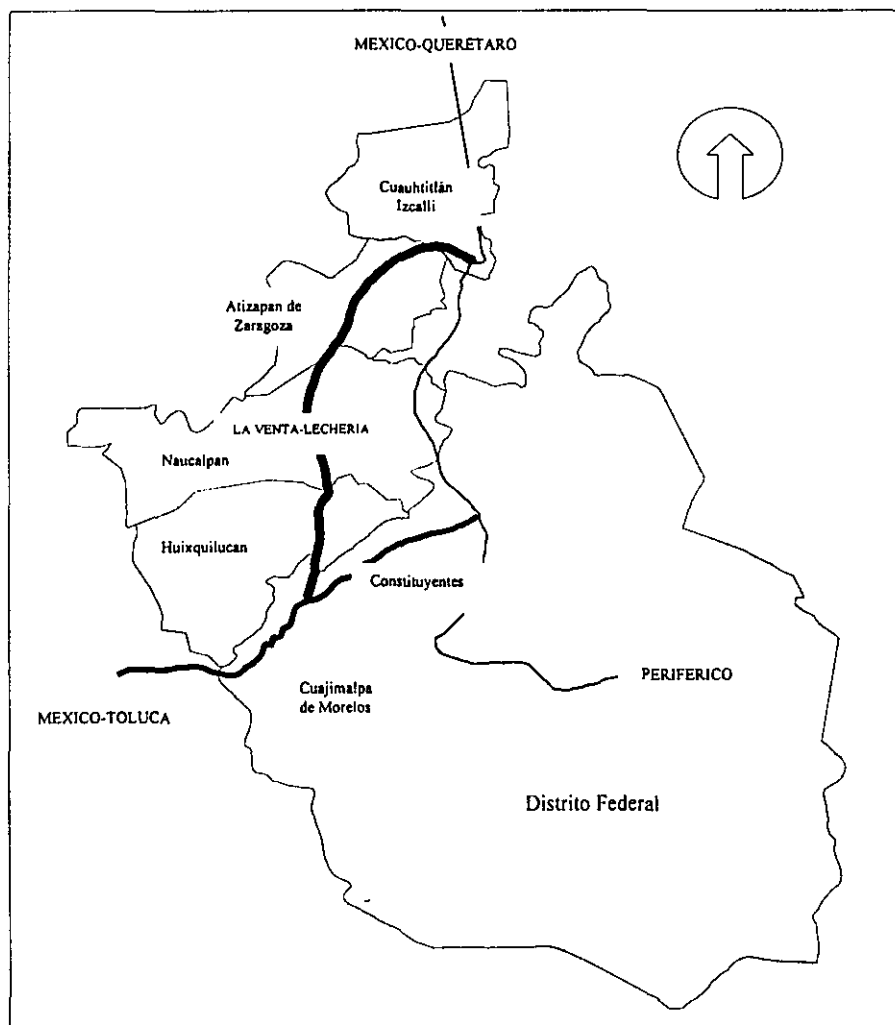


Figura 2.- Croquis de localización de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

A continuación se describen algunas características físicas de cada una de las entidades para estar más familiarizado con la zona en estudio, para la posterior verificación de campo y la validación de los datos obtenidos.

1.2.1.- Cuajimalpa de Morelos

Antecedentes históricos

El nombre de Cuajimalpa se compone de **cuauh**, que significa árbol, madera; del verbo transitivo **xima**, que con complemento de cosa quiere decir carpintear, y de la preposición locativa **pan**, que significa encima, sobre, en. Por lo tanto, la palabra significa “sobre las astillas de madera”.

Conquistada por el guerrero azteca Izcóatl, fue otorgada al reino de Tlacopan, y a la llegada de los españoles, Hernán Cortés la incorpora a su señorío, el marquesado del valle de Oaxaca; en 1534 le otorga tierras a la que hoy conocemos como cabecera Delegacional, a la que llamó desde entonces Quauhximalpan (García y coautores: *Atlas de la Ciudad de México*, 1987).

Ubicación, extensión y límites

Esta delegación se encuentra ubicada al suroeste de la ciudad de México, a 21 Km del centro de ésta, a un costado de la carretera México-Toluca, y a una altura de 2475 metros sobre el nivel medio del mar. Comprende una superficie aproximada de 77 Km que corresponden a la vigésima parte del área total del Distrito Federal. Limita al poniente y surponiente con el estado de México, al oriente y suroriente con la delegación Álvaro Obregón y al norte con la delegación Miguel Hidalgo (como se observa en la figura 2).

Características geográficas

El clima de la zona es templado y frío-húmedo, con una temperatura media mínima menor de 2°C. La precipitación anual es de 1200 mm en la parte baja y 1500 en la parte alta. En las zonas altas la permeabilidad del terreno es excelente, pero se hace prácticamente nula en las cercanías de la planicie. En las zonas de mayor altitud existen una serie de fracturas del terreno por lo que se infiltran grandes volúmenes de agua, debido a lo cual las corrientes superficiales son mínimas con relación a la cantidad de agua precipitada.

En cambio en las zonas bajas del oriente, se han formado pequeños cauces por donde el agua de la lluvia corre superficialmente en forma de lodo estacional. El agua que se infiltra en la zona poniente alimenta a los acuíferos ubicados bajo la ciudad de México.

Estructura urbana

Anteriormente la delegación Cuajimalpa tenía como único desarrollo urbano una serie de pequeños poblados rurales, entre ellos el pueblo de Cuajimalpa, que ha sido desde siempre la cabecera Delegacional y asiento de sus oficinas. A medida que la mancha urbana del Distrito Federal fue creciendo, empezaron a surgir pequeños asentamientos alineados a lo largo de la carretera México-Toluca, primero de forma aislada y posteriormente en forma de fraccionamientos residenciales, esto también sucedió con el camino Santa Fe - La Venta y el antiguo camino a Toluca.

Hasta hace poco predominaban las características rurales en los asentamientos de la delegación, pero actualmente esto ha cambiado debido a que las zonas urbanizadas están ocupadas por familias de ingresos elevados. Prueba de ello es el fraccionamiento Vista Hermosa, el cual está construido con amplias secciones viales y con características de urbanización residencial.

Anteriormente las zonas comerciales eran escasas y se concentraban en algunos puntos de la carretera México-Toluca y en los poblados. Actualmente se encuentra en operación el proyecto Centro Urbano Santa Fe que comprende 172 000 m² de oficinas y servicios, 121,000 m² de áreas residenciales, 29 000 m² de espacios comerciales y áreas de entretenimiento, 33 000 m² para un hotel y 192 000 m² de estacionamientos subterráneos, todo en su conjunto suman en total 547 000 m² de construcción sobre un terreno de 82 000 m², este proyecto se construyó en lo que anteriormente eran las minas de Santa Fe.

Vialidad

La carretera México-Toluca era la principal vía de comunicación de Cuajimalpa, con el paso del tiempo esta vía era insuficiente para la demanda vehicular de la zona y genera grandes congestionamientos, debido a esto se llevó a cabo la construcción de la autopista concesionada México-Toluca de cuatro carriles con la cual se disminuyó el congestionamiento vehicular, estas dos carreteras en su conjunto eran la columna vertebral de todos los desarrollos de la zona tanto rurales como urbanos, pero actualmente con la puesta en operación de la autopista concesionada La Venta-Lechería se aumentó los accesos a la zona, siendo esta una conexión entre la autopista México-Toluca y la México-Querétaro, y enlaza a la zona de Norte a Sur y viceversa con una reducción de tiempo.

Reservas Ecológicas

La zona poniente tiene una vegetación pinácea con un alto grado de conservación; parte de ella lo constituye el Parque Nacional Miguel Hidalgo y Costilla. Inversamente, la zona oriente carece de vegetación importante. Dado el tipo de clima y la roca de origen, se han formado suelos regosoles que se encuentran bien conservados en la zona boscosa. Sin embargo en las zonas deforestadas los suelos han perdido su fertilidad o prácticamente han desaparecido, presentándose con estos procesos erosivos más fuertes.

1.2.2.- Huixquilucan

Antecedentes históricos

El nombre de este municipio es de origen náhuatl: **Huizquilucan** o **Huitzquilo** deriva de **Huitzquilitl**, cardo, y de la partícula final de lugar can, esto es, “lugar de cardos”. El pueblo fue fundado por los caciques: Alonso Huetzin Apopocatzin, de Tlacopan, y Miguel Tolohuatzin, de Texcoco, enviados por Hernán Cortés. En las cercanías de Huixquilucan se llevó a cabo la celebre batalla del monte de las Cruces, el 30 de Octubre de 1810. En 1861 Leandro Valle y Santos Degollado fueron fusilados por los conservadores en este municipio (García y coautores: *Atlas de la Ciudad de México*, 1987).

Ubicación, extensión y límites

El municipio de Huixquilucan se localiza en la zona sur de la región socioeconómica II (Zumpango), que pertenece al Sistema Urbano Valle Cuautitlán-Texcoco; su cabecera municipal está situada a 99° 24' 15" de longitud oeste y 19° 26' 27" de latitud norte; se localiza a una altura de 2 800 metros sobre el nivel del mar. La superficie total del municipio es de 14 258 hectáreas, por lo que ocupa el séptimo lugar en extensión territorial del total de los municipios conurbados (como se observa en la figura 2).

El municipio de Huixquilucan se encuentra en el límite poniente del Distrito Federal, colinda al norte con el municipio de Naucalpan, al sur con el de Ocoyoacac y con el Distrito Federal, y al oeste con el municipio de Lerma.

Características geográficas

En el relieve del municipio se pueden distinguir dos zonas geomórficas: la primera la constituye una zona accidentada que comprende parte de la sierra de las Cruces, y está formada por montañas, cerros, arroyos y cañadas. La segunda está conformada por cerro de

baja altura y áreas de largas lomas y lomeríos; en la parte Este del municipio se localiza una de las porciones más erosionadas, debido a la deforestación y explotación de minas de arena.

El clima que predomina en el municipio es templado con lluvias en los meses de Mayo a Octubre; los meses más calurosos son Abril, Mayo y Junio, y la dirección de los vientos en todo el año es de oriente a poniente.

Estructura urbana

Con base en el Plan Municipal de Desarrollo, y de acuerdo al uso actual del suelo, el territorio de Huixquilucan se clasifica en dos grandes áreas: la primera llamada urbanizable, constituida por el área urbana actual y el área delimitada para el posible crecimiento. La segunda, llamada área no urbanizable que se localiza en la porción oeste del municipio, lo que anteriormente se llamaba bosque natural La Marquesa.

Actualmente el área urbana de San Fernando-La Herradura está formada de manera discontinua debido a la creación de fraccionamientos con un deficiente e inarticulado sistema vial primario, a lo que se suman los problemas derivados de la ocupación de barrancas y minas por zonas habitacionales, como en Jesús del Monte y Palo Solo.

La mayoría de la población de Huixquilucan habita en viviendas precarias y populares, en tanto que una minoría lo hace en viviendas residenciales.

En el plan, se clasifica a la vivienda en: vivienda precaria, caracterizada por la tenencia irregular del suelo o en proceso de regularización, construida con materiales perecederos, sin servicios de infraestructura, y sus habitantes cuentan con ingresos menores o iguales a un salario mínimo. Ejemplos de este tipo de viviendas son las colonias Federal, Burocrática y Ampliación El Olivo. En el caso de la vivienda de tipo popular, la propiedad del uso del

suelo está regularizada o en proceso de regularización y el ingreso promedio de sus habitantes es de uno a veinticinco días de salario mínimo. La vivienda residencial es aquella que está en óptimas condiciones de construcción, con la mejor vialidad y servicios de infraestructura, a excepción de los desarrollos en condominio; se caracteriza principalmente por lotes mayores a 252 m². Ejemplo de la vivienda de tipo residencial lo tenemos en las colonias Lomas las Palmas, Bosques de las Lomas, Lomas de Tecamachalco, La Herradura.

Vialidad

En el área urbana de San Fernando-La Herradura hay una falta de continuidad vial; existen sólo tres arterias de articulación de esta zona con el resto de área metropolitana. Las principales carencias viales que tenía esta localidad hasta hace una década eran en el sentido norte-sur, lo cual obligaba a que la población realizara desplazamientos mayores y con ello provocaba la saturación de las vías primarias (avenida de los Bosques, bulevar Moctezuma y avenida Bosques de las Lomas). Con la construcción de la nueva autopista se podrá solucionar parte de este problema, pues tendrán salida al Distrito Federal por la carretera México-Toluca o por la México-Queretaro.

Los fraccionamientos residenciales cuentan sólo con circuitos viales, que no dan continuidad a la estructura vial primaria y secundaria del municipio.

1.2.3.- Naucalpan de Juárez

Antecedentes históricos

El nombre de este municipio es de origen náhuatl y significa “en cuatro barrios”; esta formado por **nahui**, cuatro; **calli**, casa, o **calpulli**, barrio, y la partícula final **pan**, de lugar. En la época prehispánica el municipio fue asiento de la cultura tlailca. En el periodo colonial, este territorio perteneció a la alcaldía de Tacuba, y en él se edificaron en el siglo XVI la parroquia de San Bartolomé Apóstol y el santuario de la Virgen de los Remedios.

La cabecera municipal obtiene el rango de villa en 1874, y no es hasta 1957 cuando se le otorga la categoría de ciudad. Posteriormente, el 19 de marzo de 1976 modifica su nombre de Municipio de Naucalpan de Juárez (García y coautores: *Atlas de la Ciudad de México*, 1987).

Ubicación, extensión y límites

Este municipio se encuentra ubicado en la porción oriental del Estado de México y al Noroeste del Distrito Federal. La altura promedio sobre el nivel del mar es de 2 650 metros; tiene una superficie aproximada de 19 661 ha, la cabecera municipal se localiza a 99°23'11" de longitud W y a 19°32'08" de latitud N.

Limita al norte con los municipios de Atizapán de Zaragoza y Tlalnepantla, al sur con Huixquilucan, al este con el Distrito Federal y al oeste con Jilotzingo (como se observa en la figura 2).

Características geográficas

El clima de este municipio es templado con régimen lluvioso en verano. Morfológicamente el municipio presenta un plano inclinado que culmina con la cadena montañosa de Monte Alto, la cual lo separa con el valle de Toluca; la zona occidental posee la mayor parte de las elevaciones en sus límites con Jilotzingo.

Estructura urbana

De acuerdo con el uso potencial y actual del suelo, el territorio de Naucalpan se clasifica en dos grandes áreas: la primera, la llamada urbanizable y la segunda es la no urbanizable. La superficie de la no urbanizable era aproximadamente de 12,471 ha, se ha modificado debido al excesivo crecimiento poblacional de la zona conurbada de la ciudad de México.

La vivienda en Naucalpan como en todos los demás municipios es función de los distintos estratos sociales y se clasifica en; precaria, popular y de tipo residencial, siendo la principal característica de esta última el poseer una mayor dotación de servicios. La vivienda de tipo precaria caracterizada por una tenencia irregular del suelo, o en el mejor de los casos, en proceso de regularización, construida con materiales perecederos, sin servicios de infraestructura, cuando los tiene son deficientes y por lo general es habitada por pobladores con ingresos menores a un salario mínimo. Los poblados de Chamapa y San Mateo Nopala son típicos de este tipo de vivienda.

En cambio la vivienda de tipo popular es aun más antigua que la precaria, por lo tanto es mas consolidada; cuenta con servicios de infraestructura, aunque deficientes, la propiedad del suelo en esta zona esta regularizada o en proceso de regularización, el ingreso promedio de sus habitantes es de uno a 1.5 veces el salario mínimo. El Molinito y San Miguel Tecamachalco son ejemplos claros de este tipo de vivienda.

Por último la vivienda del tipo residencial posee una mayor dotación de servicios y una mejor vialidad. Una de las principales características de este tipo de vivienda son sus lotes, en promedio son mayores a los 250 m² y sus habitantes tienen ingresos de más de cinco salarios mínimos. Son ejemplos de este tipo de vivienda Ciudad Satélite, Lomas Verdes, La Florida, Echegaray, etc.

El equipamiento y los servicios urbanos en Naucalpan se localizan primordialmente en las áreas contiguas al bulevar Ávila Camacho, Ciudad Satélite y el centro tradicional de Naucalpan, lo que determina la existencia de áreas con fuertes carencias, principalmente en la zona de San Rafael Chamapa y Rincón Verde, en este municipio se encuentra la concentración comercial más importante del estado.

Vialidad

El funcionamiento vial en general en Naucalpan es deficiente y conflictivo debido a varios factores, entre otros a que en el área urbana se encuentra estructurada en torno al bulevar Manuel Ávila Camacho, anteriormente no se contaba con vías alternas en el sentido norte-sur, lo que ocasionaba que este bulevar soportara todo el flujo vehicular de la región aun en el caso de movimientos locales, con la puesta en operación de la autopista de cuota Chamapa-Lechería disminuirá el congestionamiento vehicular de la zona ya que es una vía alterna para el bulevar en el sentido norte-sur y tendrá también intersección en el sentido oriente-poniente del cual carecían. Con la construcción de esta nueva vía se solucionara el problema de desplazamientos mayores y la saturación de las vías por los habitantes de esta zona.

1.2.4.- Atizapán de Zaragoza

Antecedentes históricos

El nombre del municipio es de origen náhuatl y significa "en agua de yeso"; su etimología puede descomponerse en los siguientes elementos: **atl**, agua, **tízatl**, yeso; **pan**, encima o sobre algo. El ayuntamiento de Atizapán se funda en 1850, y el municipio el 3 de septiembre de 1874. La cabecera municipal antiguamente se llamó Atizapán de Zaragoza y desde 1949 recibe el nombre de Ciudad López Mateos (García y coautores: *Atlas de la Ciudad de México*, 1987).

Ubicación, extensión y límites

El municipio de Atizapán de Zaragoza se ubica en la porción centro-este del Estado de México y al noroeste del Distrito Federal. La cabecera municipal se localiza aproximadamente a 99° 21' 15" de longitud oeste y a 19° 36' 43" de latitud norte, a una altura sobre el nivel del mar de 2400 metros, ocupa una superficie de 9030 ha. Sus límites son al

norte, Cuautitlán Izacalli y Nicolas Romero; al sur con Jilotzingo y Naucalpan; al este Tlalnepantla, y al oeste, Isidro Fabela (como se observa en la figura 2).

Características geográficas

El clima que predomina en esta zona es templado, con lluvias en los meses de Junio y Julio. Este municipio cuenta con escasos recursos hidrológicos, ya que en la actualidad existen pocos pozos para la extracción de agua y un desagüe en la barranca del Pedregal y en San Javier. El relieve del municipio presenta dos formas diferentes: la primera corresponde a las zonas simiplanas del sureste y la segunda corresponde a las zonas planas del oeste.

Estructura urbana

El territorio de Atizapán de Zaragoza se clasifica en dos grandes áreas de acuerdo con el uso del suelo; la urbanizable y la no urbanizable. La primera constituida por la superficie urbana actual, la reserva territorial y además un distrito recreativo de 7180 ha.

En la década del ochenta en esta zona existía una gran oferta de suelo para uso habitacional, lo que ocasiono la ocupación de áreas ejidales para la construcción de asentamientos populares, provocando la proliferación de asentamientos irregulares, incrementándose considerablemente, y han originado graves problemas en materia de tenencia de la tierra.

En general puede afirmarse que el equipamiento de los servicios es insuficiente para cubrir las necesidades de la población.

Vialidad

Hasta antes de la construcción de la autopista Chamapa-Lechería, el municipio de Atizapán no contaba con un sistema vial integrado, ya que por un lado, la construcción arbitraria de los fraccionamientos proyectados por particulares sólo se limitaban a resolver las

necesidades viales internas, sin tomar en cuenta el entorno en donde se encontraban y por otro lado, la ocupación del suelo mediante asentamientos irregulares y precarios, en donde la vialidad era un elemento secundario que se definía conforme se iban lotificando las zonas, esto trajo como consecuencia que se trazaran calles irregulares, desarticuladas y de diversas dimensiones que no permiten una continuidad vial entre las colonias de este municipio.

La estructura vial se basaba básicamente en siete vías primarias que, en su conjunto, tienen una longitud aproximada de 35.1 kilómetros; tres de estas se caracterizan por ser las más transitadas, a tal grado que actualmente resultan insuficientes por el gran parque vehicular que las transitan. Estas son: la carretera Atizapán-Nicolás Romero, la avenida Lago de Guadalupe y la vialidad conformada por las avenidas Paseo de los Gigantes, Las Haciendas, Arboledas de las haciendas y la calzada de los jinetes. Cabe señalar que estas tres vías confluyen en la autopista México-Querétaro.

1.2.5.-Cuautitlán Izcalli

Antecedentes históricos

Es el municipio de más reciente creación de todos los municipios conurbados que comprenden la ZMCM, se formó el 22 de Junio de 1973 con localidades segregadas de los municipios de Tepotzotlán y Tultitlán. Su cabecera municipal es Cuautitlán Izcalli (García y coautores: *Atlas de la Ciudad de México*, 1987).

Ubicación, extensión y límites

Este municipio se ubica en la porción centro-oeste del Estado de México. La cabecera municipal se localiza aproximadamente a 99° 43' 46" de latitud norte, tiene una superficie aproximada de 11 952 ha, la altitud promedio es de 2300 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con Tepotzotlán y Teoloyucan, al sur con Tlalnepantla y Atizapan de

Zaragoza; al este con Cuautitlán de Romero Rubio y Tultitlán, al oeste con Tepotzotlán (como se observa en la figura 2).

Características geográficas

El municipio de Cuautitlán Izcalli se ubica en una enorme llanura, en la que sobresale únicamente el cerro de Santa María de Guadalupe. El clima predominante de esta zona es templado, lluvioso en verano durante los meses de Junio a Septiembre. Los recursos hidrológicos con que cuenta el municipio son; el río Cuautitlán, que atraviesan la zona de norte a oriente y los cinco cuerpos de agua que son considerados como presas; Guadalupe, El Ángulo, La Piedad, El Muerto y La Laguna; el más importante de estos cuerpos de agua es la presa de Guadalupe, que se localiza en la porción sudoeste del municipio, cuenta con una capacidad aproximada de 57 millones de metros cúbicos; la finalidad principal de esta presa es de riego. La nueva autopista pasa por el extremo norte de la presa El Ángulo, que actualmente se encuentra seco debido a que es un cuerpo de agua intermitente.

Estructura urbana

En esta zona se puede diferenciar tres tipos fundamentales de vivienda: la popular, la media y la residencial. La popular se caracteriza por tener una tenencia irregular del suelo o se encuentra en proceso de regularización; esta construida con materiales perecederos, los servicios de infraestructura son deficientes y por lo general la habitan familias con ingresos menores a un salario mínimo. Los asentamientos de Buenavista, Bellavista, Jiménez Cantú, Luis Echeverría, Halcón Oriente, La Joyita y 3 de Mayo, entre otras, son típicas de esta clase de vivienda.

En cambio la vivienda de tipo media se localiza en las colonias regulares o fraccionamientos como lo son: Infonavit Norte, Loma Bonita, Granjas Lomas, La Quebrada, Bosques de la Hacienda, Arcos del Alba, Arcos de la Hacienda, Valle de la

Hacienda, etc. Cuentan con niveles medios de servicios públicos, y en general sus unidades presentan buenas condiciones de mantenimiento.

Por último la vivienda de tipo residencial en general se ubica en los fraccionamientos que cuentan con la mejor dotación de infraestructura urbana y vialidad. Sus habitantes tienen ingresos superiores a los cinco salarios mínimos y se localizan en su totalidad en las inmediaciones de la presa Guadalupe.

En general el equipamiento urbano y los servicios en este municipio se localizan principalmente en el corredor urbano, lo que determina la existencia de áreas con óptimos niveles de servicios y otras con fuertes carencias, principalmente en las zonas de la periferia.

Vialidad

Cuautitlán Izacalli se comunica regionalmente por la autopista México-Queretaro que la cruza de norte a sur; las vías primarias del municipio son; avenida Quetzatcoatl y Jorge Jiménez Cantú de norte a sur, avenida Chalma, Huixquilucan, Teotihuacan, Tenango del Valle y calzada Hidalgo de oriente a poniente, todas estas se encuentran pavimentadas y en buen estado, cuenta también con vías secundarias que son generalmente de los fraccionamientos. La avenida Jesús Jiménez Gallardo comunica todas las áreas urbanas de Cuautitlán y además hay una liga con la autopista México-Queretaro.

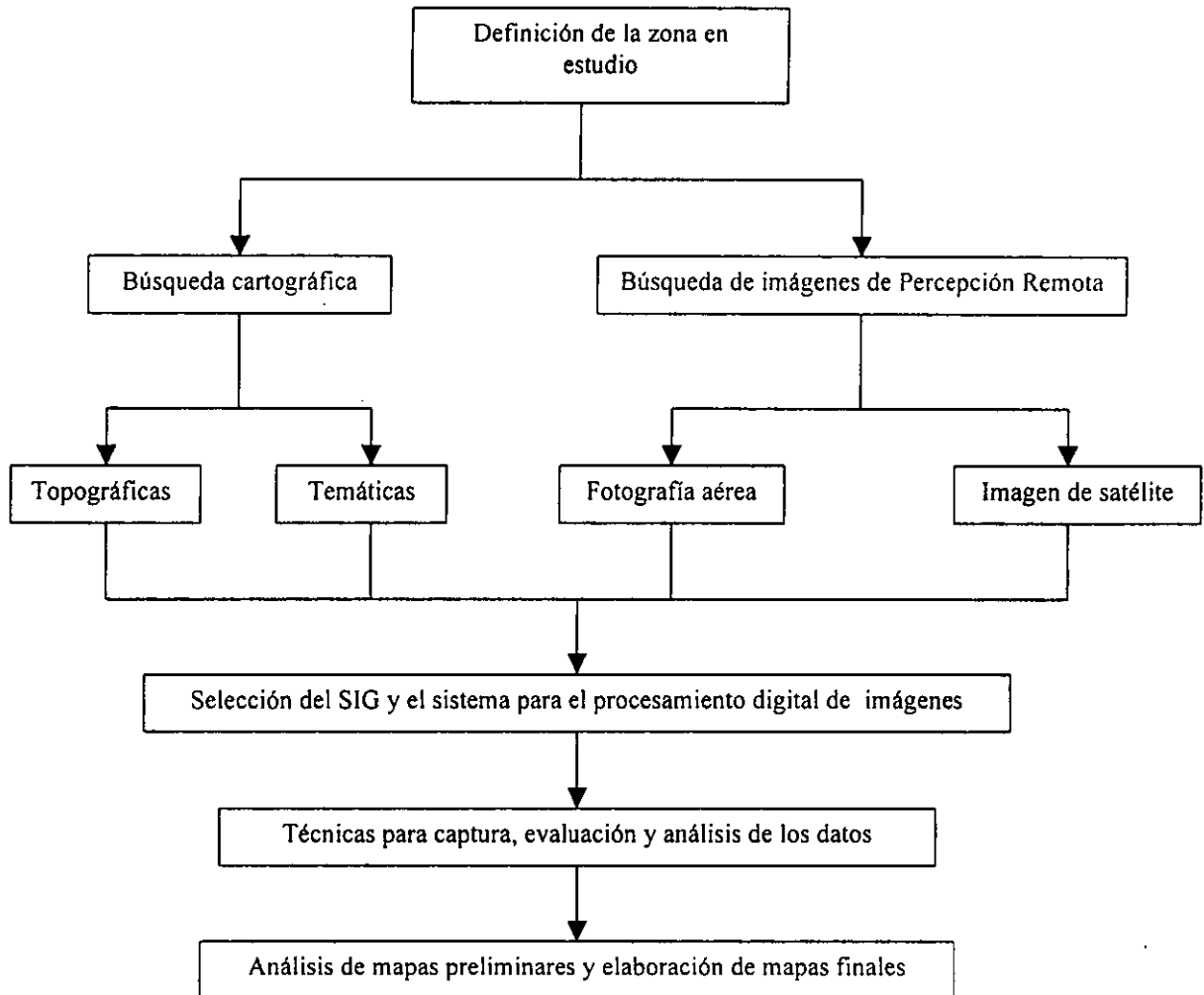
CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO

En la actualización cartográfica (topográfica o temática) se presenta el problema de la diversidad de información a manejar, y por esto es necesario aplicar diferentes pasos metodológicos que permitan realizar esta actividad de manera eficiente y veraz.

El estudio de la evaluación del Uso del Suelo, en la zona poniente de la Ciudad de México se integró en el Sistema de Información Geográfica (SIG) ILWIS (The Integrated Land and Water Information System, 1992) con una serie de datos que permiten analizar en forma exhaustiva la zona en estudio, con un rápido manejo de la información dada por el SIG., y lo más importante es tener una forma precisa de la representación cartográfica que nos permite hacer la actualización y manipulación de las variables que intervienen en el proceso de estudio de los cambios en el uso del suelo y llevar un seguimiento de la transformación (metodología).

A continuación se presenta el esquema metodológico y la aplicación se desarrolla en el capítulo III.

Esquema metodológico general



2.1.- Búsqueda y selección del material a procesar

2.1.1.- Cartografía de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)

Importancia de la Cartografía

Para administrar, aprovechar y preservar adecuadamente los recursos naturales es necesario estudiarlos y evaluarlos en la forma apropiada. La planeación de un país solo podrá lograrse cuando se cuente con información suficiente, confiable y oportuna de sus recursos naturales. La información sobre estos puede expresarse en forma: escrita, gráfica, numérica y cartográfica. Esta última ofrece las mayores ventajas, se puede observar, analizar y medir sobre ella y puesto que ocupan un lugar en el espacio, es posible situarlos geográficamente, en mapas o cartas. Representados de esta forma, permiten tener una idea clara, precisa, práctica y objetiva de su realidad, para entender su magnitud, distribución e interrelación; observando la dinámica de uso y el grado de afectación de cada una de ellos.

Información que produce el INEGI a través de la Dirección General de Geografía (DGG)

A través del tiempo se habían hecho intentos para realizar la cartografía de los recursos naturales de nuestro país, no es sino a partir de la década del cincuenta cuando se empezó a elaborar algunos trabajos cartográficos enfocados hacia el estudio de estos, además coincidió con el incremento en el uso de la fotografía aérea y de las técnicas de fotogrametría y fotointerpretación, elementos que ayudaron a facilitar el desarrollo de la cartografía.

En los años sesenta, se emprendieron algunos trabajos de inventario de los recursos naturales a nivel nacional, dentro de los campos agropecuario y forestal, pero fue hasta

finales de 1968 cuando se crea la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL), hoy Dirección General de Geografía (DGG) perteneciente al INEGI, la cual tiene a su cargo todo el inventario del territorio nacional. Con la creación de esta institución, se desarrolla un sistema de información geográfica integrado por cuatro subsistemas que a continuación se describen:

- El de condiciones físicas, cuenta con información actualizada sobre aspectos topográficos, geodésicos y climáticos, información representada en cartas topográficas y climáticas.
- El de recursos naturales, cuenta con información cartográfica sobre la geología, hidrología, suelos, uso actual de suelo y vegetación.
- El de asentamientos humanos, cuenta con información relativa a la población de zonas urbanas, contenidas en las cartas de uso de suelo urbano, aptitud del suelo urbano, cédulas de información y fotomosaicos.
- El de actividades económicas, cuenta actualmente con información básica para el desarrollo de las actividades humanas, en sus aspectos económico y social. Las cartas de uso potencial del suelo, recursos turísticos, etc, proporcionan una parte de esta información.

En este proyecto se integraron una serie de mapas básicos (topográficos) y temáticos (uso de suelo), editados por el INEGI, escala 1:50,000 (E14A29 "Cuautitlán" y la E14A39 "Ciudad de México", 1970), que cubren la Zona Metropolitana de Ciudad de México (ZMCM).

2.1.2.- Fotografías aéreas de la zona poniente de la Ciudad de México

Para la identificación y delimitación de las unidades de uso de suelo de 1984, se emplearon durante el proceso de fotointerpretación, fotografías aéreas escala 1: 75 000, en dirección Norte - Sur o Sur - Norte, con una sobreposición longitudinal del 60% y lateral del 30%, del vuelo SINFA, que abarcan la zona en estudio.

Se realizó un reconocimiento e identificación de las unidades de Uso de Suelo en fotografías aéreas, clasificandolas con claves similares a las utilizadas por el INEGI seleccionandolas de un mosaico fotográfico donde se observa la zona de trabajo, posteriormente se ubica la línea de vuelo, y el número de fotografías ha emplear.

Algunos parámetros que influyen en la obtención de las fotografías aéreas se describen a continuación:

- *Planeación y evaluación de los vuelos.*- La planeación de un vuelo, para un determinado proyecto aerofotográfico, requiere evaluar los parámetros que influyen en le vuelo (INEGI, 1994).

Al iniciar un proyecto el planeador establecerá la información básica necesaria, incluyendo la extensión del área y sus límites, el intervalo de tiempo en que deben tomarse las fotografías, su tipo, escala, sobreposición y las especificaciones que permitan hacer los cálculos pertinentes.

Después de haberse realizado el vuelo fotográfico los negativos deben ser revelados y copiados inmediatamente a fin de poder evaluar la misión y observar si se cumplieron las especificaciones establecidas en el plan.

- *Evaluación del vuelo:*
 - La sobreposición longitudinal y lateral (máximos, mínimos y promedio).

- La altura de vuelo (escala máxima, mínima y promedio).
- El área de recubrimiento estereoscópico.
- La desviación de las líneas de vuelo.
- El giro de la cámara.
- La deriva del vuelo y el paralelismo entre líneas.

La evaluación debe complementarse con un análisis detallado de los negativos y de las copias positivas.

En el análisis de los negativos deben revisarse los aspectos puramente fotográficos; si la emulsión, no presentó problemas, si la exposición fue la correcta y si el proceso de laboratorio se hizo en las condiciones especificadas.

Posteriormente se verificarán otras condiciones como; el porcentaje de nubes y de sombras, rayaduras, raspaduras, marcas estáticas, huellas, si el sistema de vacío funciona correctamente, la densidad de las imágenes, etc.

- *Líneas de vuelo* .-Las fotografías aéreas son tomadas en forma de líneas o de fajas de vuelo, que constituyen una serie de imágenes obtenidas conforme al desplazamiento de aeroplano, mismo que mantiene una dirección, altitud, y una velocidad constante, por lo que las fotografías guardan una relación lineal entre sí.

El obturador de la cámara se abre en intervalos regulares, de tal modo que cada fotografía consecutiva se sobrepone aproximadamente en un 60% a la imagen obtenida previamente.

Cada línea o faja de vuelo se enumera en el orden en que fue tomada (no siempre las líneas de vuelo son tomadas en forma consecutiva, ya que se toma en cuenta la cantidad de nubosidad de la zona), posteriormente se procede a numerar correlativamente cada

una de las fotografías, a fin de poderlas ubicar fácilmente y poder armar el mosaico de trabajo; por lo tanto cada fotografía podrá ser identificada por el número de línea y por el correspondiente a su ubicación dentro de la misma.

- *Dirección de las líneas de vuelo.*- La determinación de la dirección del vuelo a utilizar para la toma de las fotografías, pueden hacerse siguiendo algunos de los criterios que a continuación se describen:

Si se trata de cubrir con fotografías aéreas una gran extensión de terreno (por ejemplo), es de gran utilidad hacer la toma de las fotografías en una dirección o dos (Norte-Sur o Este-Oeste).

La ventaja de este criterio radica en la simplificación de la organización y empalme de los vuelos, pero si la topografía del terreno es muy irregular puede producir dificultades para controlar la escala y las sobreposiciones.

El segundo criterio consiste en adecuar las líneas de vuelo a la topografía y forma del lugar que se piensa cubrir, sin seguir una dirección fija predeterminada, si no más bien una dirección que permita reducir al mínimo las variaciones de escala dentro de una misma faja de fotografías (siguiendo la dirección de los elementos estructurales predominantes de la zona y cubriendo la zona con el mínimo de líneas de vuelo).

El INEGI recientemente diseñó un sistema de vuelos aerofotográficos por zonas, este sistema corresponde a las claves de la cartografía 1:250,000, cuya cobertura se caracteriza por la toma de las líneas de vuelo en el sentido Norte-Sur. Al sistema antes mencionado se le denomina SINFA (Sistema Nacional de Fotografía Aérea).

- *Sobreposición y traslape.*- El traslape o sobreposición es la porción de la superficie terrestre incluida entre dos fotografías consecutivas. Es expresada en porcentaje:

- 60% de sobreposición longitudinal entre fotografías.
- 20%, 30% y 40% de sobreposición lateral entre cada fotografía.
- *Descripción de las fotografías que se emplearon.*- Se empleo un mosaico fotográfico de la zona poniente de la Ciudad de México de dos diferentes fechas con el fin de observar la evolución del Uso del Suelo en un lapso de 20 años. Las dos fechas de vuelo son; de febrero de 1984 (LÍNEA-163), y de febrero de 1994 (LÍNEA-163) escala 1:75, 000, con un cubrimiento de la zona de seis fotografías en sentido norte-sur, con clave E14-2¹.

2.1.3.- Imagen Pancromática de la zona poniente de la Ciudad de México

Se utilizo la imagen SPOT Pancromática que abarca gran parte de la ciudad de México, de Octubre de 1995.

Características de Satélite

Uno de los proyectos más novedosos empleados actualmente en Percepción Remota, es sin duda alguna el proyecto SPOT (Systeme Probatoire d' Observation de la Terre), el cual fue desarrollado para competir con el proyecto marcado por el programa LANDSAT (Guernier-Puech, 1996).

La familia SPOT es un sistema de multimisión de imágenes de alta resolución diseñado por el CNES (Centro Nacional de Estudios Espaciales), y realizado por el gobierno Francés en cooperación con Bélgica y Suecia.

Este programa se basa en dos principios fundamentales que son:

- El asegurar la continuación del servicio ante los usuarios.
- Como mejorar la calidad de los datos suministrados y de los servicios prestados.

¹Esta nomenclatura corresponde a la clave de la carta Ciudad de México

El sistema SPOT está en funciona desde hace 9 años, el SPOT1 lanzado el 22 de Febrero de 1986, el SPOT2 el 22 de Enero de 1990 y finalmente el SPOT3, lanzado el 26 de Septiembre de 1993.

Tienen una órbita circular, pero con algunas diferencias de altitud entre los pasos sobre los polos y los pasos por encima del Ecuador, debido al achatamiento terrestre, siendo casi polar para que describa trazas regulares sobre la tierra. El satélite está sincronizado de manera que realice, al cabo de cierto tiempo un número entero de revoluciones sobre su órbita.

La órbita del satélite es heliosíncrona, es decir que forma un ángulo constante con la dirección del sol (permite observar el mismo lugar a la misma hora). La órbita del SPOT es circular (822 km en el ecuador), heliosíncrona (10h 30m en el ecuador), con fases de 26 días, y su recorrido dura 101.4 minutos.

Entre las novedades más importantes con las que esta dotado este satélite, es su carga útil, la cual esta formada por dos instrumentos de exploración ópticos idénticos, denominados HRV (Haute Resolution Visible). Con estos dos sensores se obtienen imágenes en dos modalidades: Pancromático y Multibanda (verde, rojo e infrarrojo cercano), con una resolución espacial de 10 y 20 metros respectivamente.

- *Modalidad Pancromática.*- Solo se puede realizar una medición por pixel. El sector de longitud de onda que emplea esta modalidad va de: 0.51 μm a 0.73 μm . La medición mínima de energía, esta integrada por una superficie del suelo de 10 metros por lado. Esta modalidad se emplea mucho en proyectos en donde se requiere una definición muy alta del terreno, en particular es muy utilizada en el medio urbano. En contraste, es muy difícil distinguir en esta modalidad las diferentes cubiertas vegetales que componen la zona en estudio.

- *Modalidad Multibanda o Multiespectral* .- Se realizan tres mediciones en un mismo pixel, que corresponden a los siguientes sectores de longitud de onda (ver tabla siguiente). Esta vez, sin embargo la medición integra en la superficie del suelo es cuatro veces mayor, que corresponde a un cuadrado de 20 metros por lado.

La importancia de la modalidad Multiespectral en comparación con la imagen en el modo Pancromático, es que en la primera se pueden distinguir mejor los diferentes tipos de uso del suelo.

Características del sensor Multibanda o Multiespectral

Banda	Amplitud	Resolución
XS1	0.50 a 0.59 ² μm	20 m.
XS2	0.61 a 0.68 ³ μm	20 m.
XS3	0.79 a 0.89 ⁴ μm	20 m.

El área cubierta por cada escena es de 60 km. por lado, por lo que este tipo de sensores necesitan incorporar 3000 detectores en el modo multiespectral y 6000 en el modo pancromático. La resolución radiométrica por cada pixel se cifra en 8 bits en multibanda y 6 en pancromático.

Otra gran novedad del sistema SPOT, es la capacidad para variar el ángulo de observación, esto es posible por que cuenta con un dispositivo móvil instalado en su equipo óptico. Esto le permite al sensor observar la misma zona en órbitas sucesivas, reduciendo con esto la frecuencia temporal de las imágenes (26 días).

El equipo HRV permite efectuar tomas oblicuas de la zona hasta con un ángulo de 27°, esto nos permite:

² Sector del verde visible.

³ Sector del rojo visible.

⁴ Sector de infrarrojo cercano.

- Repetir las observaciones con más frecuencia, que en ciclo de órbita de 26 días.
- Contar con imágenes estereoscópicas, debido a que se cuenta con dos imágenes tomadas en dos ángulos diferentes y por lo tanto se obtienen pares estereoscópicos.

Esta modalidad nos hubiera sido de gran utilidad, pero debido a que no se contaba con ninguna toma multiespectral de la ZMCM reciente, no se trabajó con esta modalidad, ya que si hubiésemos requerido de una imagen de estas características, era necesario contar con una toma especial, pero traía consigo el aumento en el costo de la imagen y no se encuentra dentro del presupuesto del proyecto.

Descripción del funcionamiento de la familia SPOT

- SPOT1.- después de 9 años en órbita, este satélite suministra imágenes de muy alta calidad y constituye un satélite de emergencia, que es utilizado solo pocos días por todas las estaciones de recepción directa.
- SPOT2.- lanzado en 1990, sigue desarrollando su actividad, a pesar de contar con un canal de telemedición de imagen dañado. Se han realizado experimentos tendientes a posicionar el SPOT1 y el SPOT2 de manera más cercana, a efecto de que se puedan realizar tomas de vistas estereoscópicas a menos de 15 minutos de intervalo sobre ciertas zonas de la tierra.
- SPOT3.- Fue lanzado en Septiembre de 1993, está equipado con grabadores de segunda generación, los cuales son más confiables. El funcionamiento de este satélite está programado para una vida útil hasta 1997, cuando entra a su relevo el SPOT4, que se piensa colocar en órbita hasta finales de 1997.
- SPOT4.- La construcción del SPOT4 está terminada y su lanzamiento se dio a principios de 1998. Entró en funcionamiento en Marzo de 1998. El SPOT4 es una versión mejorada de los satélites actuales, cuenta con las siguientes características:

- Tiene una vida nominal de 5 años, en vez de 3 como la tienen los satélites actuales. La adición de una nueva banda espectral en el infrarrojo medio (1.58-1.75 μm). El medio infrarrojo fue considerado como esencial para facilitar la interpretación de la vegetación y de evaluar la cantidad de agua de las plantas, este concepto tiene aplicaciones con un importante peso económico.⁵
- La evolución de la banda

La mejora en la resolución espacial frente al sensor TM hace a las imágenes SPOT idóneas para tareas de análisis visual, especialmente en zonas urbanas.

2.1.4.- Imagen LANDSAT TM de la Ciudad de México

Como consecuencia de los brillantes resultados obtenidos en las primeras fotografías espaciales, la agencia espacial Norteamericana diseñó a fines de la década de los sesentas el primer proyecto dedicado exclusivamente a la observación de los recursos naturales.

El programa LANDSAT, llamado en su inicio ERST, se desarrolló con el objetivo de permitir la adquisición de datos espaciales, espectrales y temporales de la superficie de la tierra en forma global y repetitiva. Este programa fue operado por la NASA (National Aeronautics and Space Administration/NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) hasta 1985 cuando fue transferido a EOSAT (Earth Observation Satellite Company).

Los satélites LANDSAT 1, 2 y 3 se localizan a una altitud de 920 km siguiendo la órbita ubicada a 99° con respecto al ecuador. Dichos satélites atraviesan el ecuador cada 103 minutos (9:30 de la mañana hora local), período durante el cual, debido al movimiento de

⁵ como lo es la agricultura, ocupación del suelo, medio ambiente, etc.

rotación, el punto de cruce del satélite se desplaza 2752 km que es la distancia entre las proyecciones de dos órbitas consecutivas (Sanvicente, 1996).

La órbita de los satélites LANDSAT 4 y 5 también es repetitiva y se encuentra a una altitud nominal de 705.3 km formando un ángulo de 98.22° . Los satélites cruzan el ecuador de norte a sur. Cada órbita tarda aproximadamente 99 minutos para completarse, lo que permite hacer un total de 14.5 órbitas por día, cubriendo la tierra entera en 16 días.

La serie LANDSAT ha producido imágenes por medio de tres sensores diferentes:

- *Multispectral Scanner (MSS)*; imágenes en 4 bandas con un pixel rectangular de resolución 79 m x 56m, el LANDSAT 3 contó con una quinta banda en la porción térmica del espectro que tenía una resolución de 120 m por lado. El sensor MSS es un equipo de barrido óptico-electrónico. Su campo total de visión es de 11.56 grados, lo que, a la altura orbital del satélite, le permite explorar una franja de terreno de 185 km, divididos a ambos lados de la vertical de la traza.
- *Return Beam Vidicon (RBV)*; tiene sistema de televisión de 3 canales, el LANDSAT 3 tenía solo un canal. Fueron incorporados por los primeros satélites LANDSAT, cada una de las cuales registraba información en una banda espectral comprendida entre el verde y el infrarrojo cercano. Su resolución espacial era de 80 metros, cubriendo la misma superficie del sensor MSS.
- *Thematic Mapper (TM)*; es un barredor multispectral de 7 bandas y resolución de 30 m por lado. El incremento de la resolución espacial y espectral que ofrece el TM, facilita una mayor precisión para la elaboración de cartografía temática. Con el diseño del TM se pretendió mejorar las deficiencias observadas en las imágenes MSS, incorporando información de cuatro bandas del espectro no contempladas en le MSS (azul, dos en el infrarrojo medio y uno en el infrarrojo térmico). El principal problema del TM radica en

el costo y el volumen de datos que ofrece, de difícil manipulación cuando no se tienen los recursos informáticos necesarios.

- *Enhanced Thematic Mapper (ETM)*⁶, se tiene contemplado que el último satélite que se va a lanzar cuenta con dos sensores nuevos que son: un instrumento formador de imágenes semejantes al TM pero con 8 bandas, donde se incorpora una banda pancrómica, con una resolución espacial de 15 metros; y el *Multilinear Array (MLA)*, que es un barredor multiespectral de captura a lo largo de la dirección de desplazamiento del satélite y contará con 8 bandas y una resolución máxima de 10 metros en la porción del visible.

Este tipo de imágenes no son muy empleadas de debido a la alta resolución espacial que tienen pues van desde 30 x 30 metros en las bandas; 1,2,3,4,5 y 7, hasta los 120 x 120 metros en la banda 6 del canal térmico, pero tiene la ventaja de obtener datos frecuentemente (cada 16 días).

CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS DEL SENSOR LANDSAT TM

BANDA	RANGO	INTERVALO	PODER DISCRIMINATORIO
1	Visible ⁷	0.45-0.52	Agua
2	Visible	0.52-0.60	Agua y Vegetación
3	Visible	0.63-0.69	Vegetación y Suelo
4	Infrarrojo Cercano	0.76-0.90	Vegetación, Suelo seco y Arena
5	Infrarrojo Medio	1.55-1.75	Suelo y Vegetación
7	Infrarrojo Medio	2.08-2.35	Temperatura(grados centígrados)
6	Infrarrojo Térmico ⁸	10.4-12.5	Suelos y Vegetación

⁶ El lanzamiento fallo y el satélite cayo en el Océano Indico, por tal motivo el programa se suspendió temporalmente.

⁷ Resolución espacial 30 metros (bandas 1,2,3,4,5 y 7).

Estas imágenes son de gran utilidad para la elaboración de cartas temáticas a escalas chicas; 1: 250,000 y 1: 1000,000. El principal problema que presenta el sensor TM esta en le costo y en el volumen de datos que ofrece, de difícil manipulación cuando escasean los recursos informáticos.

2.2.- Software para el procesamiento digital de imágenes empleado.

2.2.1.- Software básico

En este proyecto nos interesa el software de aplicación. Este software debe considerarse en dos partes. La primera parte es el Sistema Operativo que se utilizará para el tratamiento digital de imágenes y la segunda son las herramientas que son utilizadas en Percepción Remota, si bien es difícil poder establecer un límite entre estos dos partes, sí hay funciones específicas de cada una de estas (por ejemplo; los archivos raster y los archivos vector).

El análisis de datos en Percepción Remota requiere de un Software especializado, que se pueda operar desde una PC hasta una gran computadora. La rápida evolución de las PC, tanto en su capacidad de computo, velocidad y precio, las han convertido en una plataforma adecuada para trabajos de investigación, docencia y para aplicaciones de la Percepción Remota.

La mayoría de los software comerciales, que son utilizados para el tratamiento digital de imágenes son modulares, de tal forma que se van diferenciando las funciones específicas de cada uno de los distintos módulos, por lo que el usuario solo adquiere las que son de utilidad en su proyecto (Arozarena, 1995).

Los módulos mínimos que son necesarios para el tratamiento digital de imágenes a continuación se describen:

⁸ Resolución espacial de 120 metros (banda 6).

- *Núcleo:* Es el que sustenta el corazón del paquete del software, encontrándose en el rutinas y más elementos del tratamiento digital de imágenes. Entrada/salida (discos, cintas, impresoras, plotters, etc.), visualización de la imagen, manipulación de la imagen y gráficos (overlay) y gestión de ficheros (de imagen, de gráficos, LUT'S, etc.), interface con el sistema operativo, realce interactivo, filtrado especial elemental(gradiente, media, mediana, filtrado de pasa-altas, filtrado de pasa-bajas,etc.), estadísticos de la imagen, manipulación geométrica de la imagen (zoom, comparación interactiva, panning, etc.), manipulación pixel a pixel (lectura de coordenadas), correcciones radiométricas (realce lineal, de escalón, por rampas, etc.), conexión y reconocimiento de los periféricos conectados al sistema, etc.
- *Entrada/Salida:* Es el módulo que controla los distintos periféricos de estos dos bloques, hay que tomar en cuenta la aplicación en Percepción Remota de nuestro sistema de tratamiento digital de imágenes, por lo que en este módulo debe de tener los comandos imprescindibles para cargar sobre la memoria del disco las imágenes provenientes de los distintos sensores que suministran datos digitales para las aplicaciones en Percepción Remota, el HVR en los módulos Pancromático y Multiespectral del programa SPOT, TM y MSS del programa LANDSAT, SAR y OPS del programa JERS-1, LISS-I y LISS-II del programa IRS-1A y IRS-1B, datos de radar del programa ERS, datos AVHRR del programa NOAA, además de las rutinas generales para cargar cualquier imagen en los formatos estándar en Percepción Remota (BIL, BSQ, BIP, SHARP, etc.).

Con estos dos módulos mencionados anteriormente se tienen las funciones básicas de un sistema de tratamiento digital de imágenes, claro aun esta muy lejos de ser un sistema fuerte. Los módulos avanzados son los que nos permiten configurar un mejor sistema para el tratamiento digital de imágenes atendiendo nuestras necesidades.

A continuación se describen estos módulos avanzados:

- *Aritmética de imagen y de operaciones booleanas:* Este módulo nos permite realizar operaciones aritméticas entre imágenes y/o bandas de imágenes multispectrales (suma, resta, división y multiplicación) así como de aplicar funciones logaritmo, exponencial, seno, coseno y las operaciones booleanas (AND, OR, XOR, NOT). Combinación de imágenes (merge, layout, índices).
- *Correcciones atmosféricas:* Es un módulo de evidentes aplicaciones, en Percepción Remota. Permite modificar los valores de gris de los píxeles debido al efecto atmosférico que de ellos subyacen debido a la radiación difusa y de la emisión propia de la atmósfera en la trayectoria óptica de la radiación hasta llegar al sensor. Depende de los distintos modelos atmosféricos existentes en el módulo y de la concentración de los aerosoles en la atmósfera modelo que es elegida, así como de la hora solar, la altura, el azimut de la plataforma y el sol (geometría del barrido de la escena).
- *Corrección geométrica y cartográfica:* Se pueden separar ambas funcionalidades (así lo manejan algunos módulos) pero dado la íntima relación que tienen las aplicaciones de la cartografía con la adaptación de la imagen a una proyección cartográfica (con su elipsoide de referencia y los parámetros geodésicos definidos). Este módulo nos permite obtener una imagen a la que se le han retirado los distintos efectos geométricos que son introducidos por la forma de captura de la imagen digital.
- *Filtrado especial:* En este módulo están incluidos los métodos de proceso de la imagen destinados a mejorar el aspecto visual de la imagen para su interpretación visual o para realzar los distintos fenómenos enmascarados en la imagen y que son de interés para el usuario. Hay una amplia variedad de filtros especiales, lineales y no lineales que están presentes en cualquier software para el tratamiento digital de imágenes. Un aspecto importante es que a pesar de las rutinas de filtrado que están directamente por el software, se deben permitir a los propios usuarios definir sus propios filtros.

- *Filtrado en el dominio de las frecuencias:* Este módulo nos permite trabajar con el dominio de las frecuencias. Cualquier software tiene implementado estas rutinas (directamente o inversamente) a través del CPU, pero debido al elevado tiempo de cómputo que ocupan, estas transformaciones se deben incorporar en una tarjeta específica que descarguen al CPU de estas labores.
- *Análisis multivariado:* Es el módulo en donde deben estar las funciones de los componentes principales, como; cálculo de la matriz de varianza-covarianza, análisis de discriminante, etc.
- *Clasificación:* Módulo en el que se incorporan todas las funciones de reconocimiento de formas (clasificación clases supervisadas y no supervisadas) y las herramientas anexas (análisis estadístico, firmas espectrales, campos de entrenamiento, etc.) así como de los elementos necesarios para la depuración (tablas de contingencia y matrices de confusión) de los estadísticos a aplicar, entre los clasificadores más utilizados podemos mencionar; el de Máxima probabilidad, el de mínima distancia, el paralelepípedo y el algoritmo no supervisado (estos módulos se emplean generalmente para la elaboración de cartas temáticas).
- *Periféricos especiales:* Este módulo además de manejar los periféricos estándares (cintas, discos duros e impresoras) debe tener las funciones básicas para poder manipular otros periféricos específicos (procesadores pipeline, tableta digitalizadora, cámara de vídeo, etc). Hay que tomar en cuenta que uno de los factores que se deben considerar en un sistema de tratamiento digital de imágenes en cuanto a software se refiere, es la cantidad y calidad de los periféricos que se pueden llegar a necesitar.
- *Conversión a distintos formatos de una imagen:* Esta capacidad le da una forma al software de versátil y flexible, para poder comunicarse a distintos entornos del tratamiento digital de imágenes y a los usuarios que manejen distintos formatos.

- *Modelos Digitales de Elevación (MDE)*: La construcción de un modelo digital de elevación a partir de imágenes espaciales o aerotransportadas (que sean digitales), con carácter de estereoscopia, es una aplicación clara de Percepción Remota y algunos software ya lo traen implementado con resultados sumamente buenos.
- *Modelos en tercera dimensión*: A partir de los modelos digitales de elevación se pueden obtener perspectivas que ayudan a interpretar el entorno geográfico de la imagen y se pueden superponer sobre el modelo digital de elevación de una imagen de satélite, con lo que se obtendrá un modelo del paisaje de la zona por trabajar.
- *Radar*: Este módulo trata de los datos radar los cuales son suministrados principalmente por la plataforma ERS-1. Las aplicaciones de las imágenes radar están actualmente en expansión y además se aprovecha un rango espectral como una capa más de información, esta siendo aplicado para la construcción de un modelo digital de elevación por interferometría.
- *Sistemas de Información Geográfica (SIG)*: Algunos Software ya incorporan módulos de un SIG, ya que tienen todas las fuentes de entrada (imágenes geocodificadas, imágenes clasificadas por diferentes temas: uso de suelo, vegetación, modelos digitales de elevación, etc.) que nos permiten explotar los datos digitales obtenidos con esta información mucho más elaborada y más útil al usuario.

2.2.2.- Algunos software de aplicación sobre PC.

- *Dragon*.- El software dragon es un programa que incorpora la mayor parte de las funciones del tratamiento digital de imágenes aplicado a la Percepción Remota, tiene pocas limitaciones, los que pone el propio hardware (PC) y el sistema operativo que utiliza (MS-DOS). La última versión implementa una capacidad de conexión a

impresoras de color, tarjetas de vídeo de 24 bits, tableta digitalizadora, etc. Este software es semiprofesional, muy adecuado para dependencias educativas.

- *JARDS (Jaune Almeras Remote Sensing)*.- Es un programa de Percepción Remota realizado por el Instituto Jaume de Ciencias de la tierra de CSIC (Barcelona), este software incorpora una gran cantidad de funciones del tratamiento digital de imágenes y soporta todos los formatos de entrada y salida.
- *ILWIS (Integrad Land Watershed Management Information System, 1992)*.- Este Sistema combina un módulo de Información Geográfica (SIG) con un módulo de sensores remotos, con este módulo se pueden ejecutar varias técnicas para el procesamiento de imágenes tales como: realce, corrección geométrica, composición de color, clasificación, etc., este es el SIG que se empleo en el proyecto.
- *PLXSAT*.- Es un sistema para el procesamiento digital de imágenes que funciona en cualquier computadora PC, este sistema al igual que los otros esta diseñado de manera modular, además de ser de creación mexicana.
- *ERDAS*.- Este software incorpora todos los módulos mencionados con anterioridad.

Cabe hacer una aclaración que no todos los Software de aplicación que se utilizan para el procesamiento digital de imágenes son Sistemas de Información Geográfica (SIG).

2.3.- Definición del Sistema de Información Geográfica (SIG).

Un sistema de información geográfica (SIG ó GIS) se puede definir como: “ Base de datos computarizada que contiene información espacial” (Cebrián y Mark, 1986) o bien como: “Una tecnología informática para gestionar y analizar información espacial”. Una

definición más amplia sería: "Un conjunto de herramientas para reunir, introducir, almacenar, recuperar, transformar y cartografiar datos espaciales sobre el mundo real para un conjunto particular de objetivos" (Burrough, 1988). Otros autores insisten más en el aspecto informático: " Un sistema de información geográfica es un tipo especializado de base de datos, que se caracteriza por su capacidad de manejar datos geográficos, es decir, espacialmente referenciados, los cuales se les pueden representar gráficamente como imágenes" (Bracken y Webster, 1990). Finalmente, es importante recordar la definición redactada por el NCGIA (National Center for Geographic Information and Analysis) de USA: "Un sistema de hardware, software y de procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión" (NCGIA, 1990).

Se ha planteado una cierta discusión sobre el verdadero significado y la esencia principal de un SIG, en especial para diferenciarlo de un programa de cartografía asistido por computadora o de uno de Gestión de Bases de Datos. Dueker (1987) y Cowen (1988) insisten en que lo más característico de un SIG es su capacidad de análisis, de generar nueva información de un conjunto previo de datos mediante manipulación y reevaluación.

Por tanto, un SIG es bastante más que un sistema de diseño asistido por computadora (CAD/CAM), y lo es por su capacidad de relacionar los elementos gráficos (puntos, líneas, y polígonos), que también son manejados por un sistema CAD/CAM, con los elementos de una base de mapas temáticos, aspecto que falta en los sistemas CAD. Por otra parte, las diferencias con los programas de Cartografía asistidos por computadora estriban en la posibilidad de manejar más de un conjunto de elementos gráficos al mismo tiempo y, sobre todo, la capacidad de construir nuevos datos a partir de los ya existentes en la base de datos, lo cual es poco habitual en los programas de este tipo.

Clasificación de las funciones de un Sistema de Información Geográfica

Un SIG es, entre otras cosas es un programa con capacidades específicas que se pueden resumir en los siguientes subsistemas ó componentes lógicos (Bosque, J. 1992):

- *Funciones para la entrada de información.*- Son los procedimientos que permiten convertir la información geográfica del formato analógico, el habitual en el mundo real (en especial la forma de mapas), al formato digital que se pueda manejar en la computadora. Esta conversión se debe realizar manteniendo todas las características iniciales de los datos espaciales. Por ello, en este subsistema se incluyen no solo los mecanismos de entrada propiamente dichos (digitalización o similares), sino también los procedimientos que permiten eliminar errores o redundancias en la información incorporada al Sistema de Información Geográfica. Previamente a la entrada de datos en un SIG, la información que se va a utilizar se debe reunir y preparar para que sea tratada y convertida al formato digital (proceso de obtención de la información).
- *Funciones para la salida/representación gráfica y cartográfica de la información.*- Se refiere a las actividades que sirven para mostrar al usuario los propios datos incorporados en la base de datos del SIG, y los resultados de las operaciones analíticas realizadas sobre ellos. Permiten obtener mapas, gráficos, tablas numéricas y otro tipo de resultados en diferentes soportes; papel, pantallas gráficas otros.
- *Las funciones analíticas.*- Se entienden como el elemento más característico de un Sistema de Información Geográfica. Facilita el procesamiento de los datos integrados en él modo que sea posible obtener mayor información, y con ella mayor conocimiento del que inicialmente se disponía.

En México existen varias instituciones publicas que desarrollan bases de datos geográficos en formato digital, para la creación de un SIG. Como ejemplo de esta el proyecto del

INEGI, a través de la DGG (Dirección General de Geografía), que recientemente ha adoptado los nuevos avances tecnológicos.

El principal resultado, hasta el momento ha sido la creación de una base de datos digital, para la elaboración de la carta topográfica escala 1:50,000, todo con el fin de elaborar una base de datos geográficos del mapa base (topográfico) de toda la república mexicana, que posteriormente servirán como base para la construcción de las cartas urbanas escala 1:20,000 y la topográfica 1:250,000.

En resumen, se puede considerar que el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica es la unión de varias líneas de trabajo hasta ahora muy diferenciados. Estas líneas de trabajo son:

- Los sistemas de cartografía asistidos por computadoras.
- El planteamiento teórico práctico de McHairg para la sobreposición de mapas con la finalidad del planteamiento urbano y regional.
- El desarrollo de la Percepción Remota.
- Los avances técnicos y metodológicos de la denominada geografía cuantitativa.

Un SIG puede suponer, entre otras cosas, la aplicación práctica, a problemas de tamaño real, de las matemáticas y estadísticas, muy refinadas, creadas por la revolución cuantitativa en Geografía.

2.4.- Captura de la información.

Todo tipo de información se puede capturar de tres formas diferentes, ya sea por Scanner, tableta digitalizadora, o por computadora. A continuación se describirán brevemente cada una de las formas antes mencionadas.

2.4.1.- Vía Scanner

La captura de la información a través de equipo de computo vía Scanner, es la más fidedigna al plano original del que se obtiene dicha información, sin embargo, esta veracidad depende mucho de la precisión del Scanner con que se lleva a cabo la rasterización, esta precisión esta dada por puntos por pulgada. Una de las principales ventajas de este procedimiento es que es totalmente automático, el equipo realiza una copia exacta del plano original, no hay posibilidad de alguna variación por parte de un error humano.

Si bien son grandes las ventajas de este procedimiento, la principal desventaja es que lo se obtiene es una copia fotográfica del plano original, esto es se genera una imagen, un archivo raster, por lo que es imposible manipularlo o asociarlo a una Base de Datos.

Esta captura nos proporciona un fichero raster, a partir del cual se hace la transformación de un formato raster a un formato vector, para lo cual existen diferentes software que permiten vectorizar la información raster de forma automática cuya precisión esta limitada por la resolución de scanner, con lo cual es posible georeferenciar, actualizar, modificar, asociar, derivar y/o generalizar la información.

Los datos raster provienen principalmente de tres fuentes; modelos que describen el mundo real, imágenes digitales escaneadas de mapas existentes e imágenes de satélite. Aunque las transformaciones de todos estos datos son similares, el primero está más relacionado con el modelo de datos del mundo real que se haya utilizado, mientras que el segundo y el tercero con los métodos de adquisición de datos.

2.4.2.- Por Tableta Digitalizadora

La captura de la información por este medio es la forma más rápida y quizá la menos costosa de capturar información gráfica, ya sea para la elaboración de un mapa y/o para su actualización.

La gran desventaja que se tiene al capturar información por este medio, es que se depende totalmente del pulso del usuario, sus conocimientos técnicos, estado de ánimo y la calidad del equipo utilizado.

La tableta digitalizadora se debe usar únicamente como una herramienta de referencia para actualizar información cartográfica ya que la información que se obtiene no es muy precisa, por lo que se recomienda que este método de captura sea el mínimo posible.

Cuando se requiere realizar un trabajo por este método, se deberá asegurar que el operador responsable de esta tarea cuente con los elementos y conocimientos técnicos para llevarlo a cabo.

En la práctica es recomendable, que al finalizar una sesión, el operador no deje inconclusa la digitalización de un rasgo, puesto que al volver a construirla introducirá más error.

2.4.3.- Por Computadora

Este es el método que actualmente se está utilizando para la extracción de rasgos geográficos en los lugares que se dedican a generar información geográfica digital, y consiste en extraer la información directamente de una ortofoto digital o imagen de satélite, identificando cada uno de los rasgos y trazandolos con el Mouse, al que se le ha asignado previamente un identificador. Este método se conoce como sobreposición raster vector.

2.5.- Procesamiento digital de imágenes.

El empleo de las computadoras para el procesamiento digital de imágenes se remonta a la década de los años sesenta, y la tecnología de estas se encuentra en una evolución continua.

Las componentes utilizados para el procesamiento digital de imágenes, en donde se incluyen los sistemas y los sensores, a estos recursos computacionales es indispensable agregarles otros dispositivos tales como; rasterizadores, tabletas digitalizadoras, radiómetros, tarjetas de video, impresoras de color.

La tecnología en el procesamiento digital de imágenes ha evolucionado rápidamente debido a los siguientes factores:

- A la gran evolución que han tenido los sistemas de computo, tanto en su rapidez como en la capacidad de almacenamiento y a los sistemas operativos empleados por los mismos.
- Los sistemas digitales de imágenes actualmente son capaces de captar la radiancia de cualquier objeto, con un mayor rango, del que es obtenido por el ojo humano o por cualquier tipo de película fotográfica.
- Una sola imagen representa gran cantidad de información en forma compacta y fácil de interpretar. Esta información esta formada por algunos millones de bits, dicha información puede ser desplegada en papel fotográfico o bien por un monitor.

¿Que es un sistema de procesamiento digital de imágenes?

Un sistema de procesamiento digital de imágenes es un conjunto de hardware y de software, que permite hacer la transformación de los datos digitales en información útil al usuario. Una ampliación de esta definición es incorporar los sistemas de captura de datos digitales de forma que sean accesibles a las computadoras.

Como en cualquier sistema de información, un sistema de imágenes consta de tres unidades las cuales son: la unidad de entrada, la unidad de proceso y la unidad de salida, en lo que se

refiere al hardware, a esto hay que añadirle el sistema operativo que va a ser el responsable de gestionar los recursos de la máquina, y ser la interfaz con el usuario, de las entradas y salidas del sistema, este a cuanto software básico se refiere.

Una vez que se tiene el hardware y el software básico, hay que añadirle el software de aplicación para el procesamiento de imágenes aplicado a la percepción remota, en nuestro proyecto se trabajara con ILWIS (The Integrad Land and Water Information Sysytem, 1992) y PIXSAT.

Una imagen digital puede representarse como matriz de números. Cada punto dentro de esta matriz le corresponde a un área del objeto que se representa y se le asigna un valor digital a cada punto en la imagen, que esta relacionado con la intensidad del área del objeto.

Otra forma de representar a la imagen se relaciona con la representación de la intensidad dentro de la imagen captada (dígito binario).

En cuanto al procesamiento digital de imágenes, es posible afirmar en general que los realces a la imagen son relativamente rápidos de ejecutar y los procesos de reconocimientos de patrones son relativamente costosos. Por otro lado, en un analizador de imágenes es muy importante la interface gráfica ya que es el vehículo de comunicación entre las transformaciones que se le aplican a la imagen y la apreciación visual de estas por el usuario en el monitor.

2.5.1.- Filtros

Muy semejante a las técnicas de fotogrametría tradicional, el filtro se aplica en el análisis digital para aislar los componentes de interés. En este caso los filtros aplicados sobre la imagen pretenden suavizar el valor numérico del pixel que la componen. El propósito de estas técnicas es aislar cierto contenido de información de una imagen con el objeto de evaluarla y cuantificarla con mayor facilidad, también la parte aislada puede ser sumada o

multiplicada con la imagen original, teniéndose así un realce de patrones de interés dentro del contorno en el que se encuentran.

De acuerdo con el objetivo que se pretenda, suelen distinguirse dos tipos de filtros: los filtros de pasa-bajas, que tienden a aislar el componente de homogeneidad en la imagen, seleccionando solo áreas en donde la frecuencia de cambio es baja, y los filtros de pasa-altas, dirigida a los componentes de alta frecuencia; esto es, en aquellas áreas de alta variabilidad, en donde el contraste espacial es muy intenso.

Ambos tipos de filtrado se pueden abordar con el mismo método. Si el objetivo de estos es poner los píxeles de la imagen en relación con sus vecinos (ya sea para homogenizarlos o diferenciarlos), bastará con realizar una serie de operaciones aritméticas entre cada uno de ellos y sus inmediatos. La forma concreta de efectuar este proceso es aplicar sobre el valor numérico del píxel original una matriz móvil de coeficientes de filtraje. Esta matriz (denominada de Kernel) puede tener un tamaño variable, en función del número de píxeles vecinos que queremos implicar en el proceso. Por lo general se trata de una matriz de 3x3 coeficientes de filtraje, que se aplica sucesivamente a todos los píxeles de la imagen.

Además se puede disponer de matrices de filtraje superiores, 5x5 o 7x7 píxeles. Cuanto mayor sea la matriz, el efecto de suavizado o de realce espacial es más intenso, al considerar un número mayor de píxeles vecinos.

2.5.1.1.- filtros de pasa-bajas

Este filtro tiende a suavizar los contrastes espaciales presentes en la imagen. Se trata de asemejar el valor numérico de cada píxel al de los píxeles vecinos, reduciendo así la variabilidad de la escena. En términos visuales, esto supone que la imagen filtrada ofrece perfiles menos nitidos, más difusos. En este caso, se pretende atenuar el denominado “ruido

de la escena”, producido en las zonas altamente heterogéneas en relación con la resolución espacial del sensor.

El caso más claro, y el más estudiado, es el que se produce en las zonas urbanas (Ciudad de México por ejemplo), en donde se mezclan distintos tipos de cobertura, en un reducido espacio. Para disminuir esta variabilidad espacial, se han propuesto diversos filtros de pasa-bajas, que tienden a homogeneizar los valores numéricos de esas zonas.

El filtrado de pasa-bajas puede obtenerse a partir de diversas matrices de filtraje. Algunas de las más habituales son:

	1.00 1.00 1.00		0.25 0.50 0.25		1.00 1.00 1.00
(a)	1.00 1.00 1.00	(b)	0.50 1.00 0.50	(c)	1.00 2.00 1.00
	1.00 1.00 1.00		0.25 0.50 0.25		1.00 1.00 1.00

En estas matrices el área filtrada se limita a los píxeles centrales, los píxeles del borde no se ven afectados por el proceso, puesto que no tienen los ocho vecinos necesarios para realizar el cálculo. La primera (a) es un simple promedio de los píxeles que contiene la ventana de filtraje (3x3), mientras las dos (b y c) siguientes ponderan el valor central para evitar una excesiva pérdida del detalle en la imagen.

2.5.1.2.- filtros de pasa-altas

Este tipo de filtros pretende resaltar los rasgos lineales, como son: carreteras, parcelas o accidentes geológicos. refuerza los contornos entre áreas homogéneas, evitando cualquier discontinuidad.

Hay varios métodos con el que se puede conseguir este objetivo. El más sencillo es restar de la imagen original la obtenida por un filtro de pasa-bajas. La razón es bastante obvia: si

lo que se pretende es aislar los componentes de alta frecuencia, bastara restar de la imagen original aquellos que correspondan a la baja frecuencia.

Es más común emplear una matriz de filtraje, similares a los anteriormente analizados. En este caso los coeficientes de filtraje se disponen de tal manera que refuerzan el contraste entre el pixel central y los vecinos. Dos matrices frecuentemente utilizadas(d y e) ambas se derivan del análisis del gradiente de cambio en la imagen.

$$\begin{array}{cc} \begin{array}{ccc} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{array} & \begin{array}{ccc} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{array} \\ \text{(d)} & \text{(e)} \end{array}$$

Las matrices antes descritas permiten resaltar cualquier rasgo fronterizo de la imagen, independientemente de su orientación. La segunda matriz de filtraje denominado Laplaciano, se recomienda para el realce de los rasgos lineales en la ciudades (Jensen,1986).

2.5.1.3.- Otros tipos de filtros (características):

- *filtro de mediana:*
 - Suelen emplearse para eliminar el ruido aleatorio de la imagen, en este proceso se puede perder bastante información.
 - El diseño de este filtro consiste en escoger el pixel central, de todos los valores de la ventana (mediana).
 - Un filtro que emplea este criterio, es el filtro de Tukey
 - Este filtro suele ser sensible a los valores extremos.
- *filtro de la moda.-* Este filtro es muy recomendado para eliminar el efecto de sal y pimienta (este efecto se presenta cuando existen manchas de color, más o menos

homogéneas, que son salpicados por los píxeles asignados a otras categorías, perdiéndose con esto su unidad geográfica y dificultando con esto su interpretación), que son el resultado de las clasificaciones no supervisada y supervisada. Este efecto se debe a una doble causa:

- A que la mayor parte de los criterios de asignación no toman en cuenta la presencia de los píxeles vecinos.
 - A la propia complejidad del paisaje, que esta directamente relacionada con la aparición de píxeles de borde (fronterizos a dos o más categorías) que son los principales responsables de dicha discontinuidad que son visibles en el mapa.
 - Este filtro suaviza los resultados de una clasificación o de un agrupamiento de píxeles.
 - El operador escoge el valor mas frecuente de la ventana (matriz de filtrado).
- *Lapacianos*. - Comúnmente conocidos como filtros direccionales y nos sirven para resaltar rasgos lineales que están presentes en la imagen.
- Con este filtro se detectan los bordes en todas direcciones.
 - La expresión de un Lapaciano para una función continua será:

$$\nabla^2 f(x,y) = \frac{\delta^2 f}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 f}{\delta y^2}$$

Los Laplacianos son muy complejos y de difícil implementación en un sistema.

Si la función discreta (niveles de grises) el filtro Lapaciano será del tipo:

$$g_{ij}^l = g_{i-1,j} + g_{i+1,j} + g_{i,j-1} + g_{i,j+1} - 4g_{ij}$$

Por ejemplo:

$$\begin{array}{ccc} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{array}$$

de donde:

$$i,j=3 \times 3$$

$N=4$ =Núcleo.

Este filtro es empleado comúnmente al final de los procesos para corregir los bordes de la imagen.

2.5.2.- Realces

Aquí se consideran las técnicas dirigidas a mejorar la calidad visual de la imagen. Es decir, disponer de la mejor manera de los datos para ser analizados visualmente, tratando con esto de evidenciar los datos más importantes que la imagen ofrece.

- *Realces radiométricos*: A los realces radiométricos se les conocen comúnmente como transformación de histogramas. Solo se realizan sobre un pixel, sin tomar en cuenta los de su alrededor. Por lo general en los realces radiométricos la modificación “pixel a pixel”, significará que para un valor de $f(x_i, y_i)$, de entrada le corresponderá $f'(x_i, y_i)$ de salida (es decir un nivel de gris N de entrada le corresponderá un nivel de gris N de salida).
- *Tablas de referencia del color*: Una tabla de referencia de color (Color Look up Table, CLUT), es una matriz numérica que indica el nivel visual con el que se presenta en pantalla los valores numéricos de una imagen. Esta tabla interactúa entre la memoria y el cañón del monitor, para la presentación visual en el monitor.
- *Empleo del Pseudo-color*: Según varios autores se ha puesto en evidencia que el ojo humano es más capaz de distinguir tonos (16 tonos) de color que intensidades de brillo (Jiménez y García, 1982). Así pues el emplear Pseudo-color facilita mucho el análisis analógico, así como la preparación de otros tratamientos digitales. El término Pseudo-color se utiliza en los tratamientos en donde se construye de manera artificial una tabla

de color. Así, una composición requiere de la participación de tres bandas espectrales, aplicadas a cada uno de los colores primarios; rojo, verde y azul (RGB).

- *Composición en Color:* Cuando se trabaja con información multiespectral, pueden obtenerse distintas composiciones en color. Bastara con aplicar a cada uno de los colores primarios (rojo, verde y azul) a una banda distinta de la imagen, seleccionándola en el orden y criterio que se juzgue más conveniente para lograr los propósitos que se persigan. Esta opción permite desplegar imágenes de distintas bandas del espectro en forma simultanea, facilitando así su análisis e interpretación. La composición más habitual es la llamada Falso Color, en donde se le asignan los colores rojo, verde y azul a las bandas que corresponden al infrarrojo cercano, rojo y verde, respectivamente. Esta composición nos permite discriminar mejor distintas cubiertas de interés como; masas vegetales, cuerpos de agua, localidades, etc., por esto es muy comúnmente utilizado en los procesos de análisis visual.

2.5.3.- Transformaciones

Como es sabido, las imágenes de satélite se componen de unidades elementales llamadas pixeles. Un pixel de una imagen de n bandas espectrales queda definido por $2+n$ coordenadas. Las dos primeras, son la fila y la columna que el pixel ocupa en el plano de la imagen y las n coordenadas restantes son los niveles de intensidad del pixel en cada banda, las cuales fijan la posición del mismo en un espacio de n dimensiones llamado espacio espectral.

2.5.3.1.- Transformación HSI

Se ha visto que en la composición en color basadas en los tres colores primarios. Existe otra alternativa para representar el color, y es respecto a sus propiedades. Se trata de la Transformación HSI (Hue, Saturation, Intensity).

El Tono procede de la longitud de onda en donde se produce la máxima reflectividad del objeto y es equivalente al color que aprecian nuestros ojos. La Saturación se refiere a la pureza de dicho color, su grado de mezcla con sus colores vecinos. Así también, la intensidad se identifica como brillo, que esta en función del porcentaje de la reflectividad recibida. La Transformación RGB a HSI puede llevarse a cabo gracias a los distintos algoritmos de conversión.

2.5.3.2.- Transformación de componentes principales

Mediante determinadas transformaciones aplicadas a las bandas que componen una imagen, es posible seleccionar un subconjunto de ellas que posean mayor valor discriminante y descartar el resto de las bandas. La transformación que se utiliza con mayor frecuencia en Percepción Remota es la transformación de componentes principales.

La transformación de componentes principales convierte la imagen original en otra cuyas bandas están incorrelacionadas, dichas bandas corresponden al espacio espectral con ejes a lo largo del primero de los cuales los datos posean la mayor varianza, la siguiente varianza más grande tiene lugar a lo largo del segundo eje y así sucesivamente hasta las n bandas. Las últimas componentes principales tienen poca varianza por lo que se considera baja su contribución a la separación de clases, pudiéndose eliminar del proceso y como consecuencia acelerara el mismo.

2.5.4.- Correcciones radiométricas

Este es un término muy general, que nos indica aquellas técnicas con las cuales se modifica el valor numérico de los pixeles originales, con el objeto de acercarlos a los pixeles que habría en la imagen en el caso de obtener una recepción ideal sin distorsiones atmosféricas.

2.5.4.1.- Restauración de líneas o píxeles perdidos

Cuando funciona mal el sensor o la antena receptora que recibe la imagen, puede que esta pierda algunas líneas o píxeles. Cuando se visualiza esta imagen, presentará una serie de líneas anormales o píxeles aislados de similar aspecto. En estos dos casos, se trata de una información perdida.

Por lo tanto no se puede restaurar lo que nunca se recibe, hay una forma lógica de estimar estos valores numéricos y es considerando los píxeles vecinos de acuerdo a una autocorrelación espacial, otra forma de sustitución es promediando los valores de las líneas y píxeles anterior y posterior a la defectuosa. Un tercer método para recuperar información perdida es utilizando una banda auxiliar con alta correlación a la que presenta el problema. Para cualquiera de los tres algoritmos se asume que las líneas defectuosas en la imagen han sido localizadas, para lo que se puede emplear un método de búsqueda automática que compara medias aritméticas de líneas, con la anterior y posterior línea. Si difiere de ellas significativamente, se realiza un estudio detallado de los valores, para detectar con esto los posibles píxeles anómalos.

2.5.4.2.- Corrección de bandeo de la imagen

Algunas imágenes que se obtienen por equipos de barrido (MSS o TM), se observa un bandeo en la imagen, que se presenta especialmente en zonas de baja radiancia, comúnmente conocido como Striping; los equipos de barrido multiespectral exploran varias líneas simultáneamente en cada oscilación del espejo. En el caso de que los detectores presenten inconsistencias, aparecerán unas líneas más oscuras o claras que el resto. Este efecto es periódico, ya que cada detector registra una de cada m líneas, siendo m el número de detectores por banda.

2.5.4.3.- Corrección atmosférica

La radiación electromagnética se ve notablemente afectada por los componentes de la atmósfera como; aerosoles, gases, vapor de agua, que provocan una dispersión en forma selectiva de la radiación transmitida.

El principal problema de esta corrección es su carácter heterógeno en espacio y tiempo, siendo no constante en la imagen. Además el efecto depende de la longitud de onda y varía entre imágenes en forma difícil de predecir. Por lo tanto, resulta complejo una corrección de la dispersión atmosférica, pues requiere de medidas simultáneas a la adquisición de la imagen.

Ante las dificultades que presenta esta corrección, es preciso realizar una estimación al menos del efecto atmosférico, siendo muy interesante en las tres situaciones siguientes;

- Al realizar combinaciones lineales entre bandas.
- Al realizar modelos que pongan en relación los valores numéricos con determinados valores físicos; temperatura, biomasa, humedad del suelo, etc.
- Al realizar estudios multi-temporales, pues la dispersión no es comparable con tomas de distinta fecha.

Existe otro método que se denomina corrección del histograma por sus valores mínimos; en donde se asume que las cubiertas de alta absorción (agua, sombras), deben presentar radiancia espectral cercana a cero; prácticamente el histograma de los valores numéricos siempre presenta un mínimo superior a este valor, esto se le atribuye al efecto de dispersión atmosférica. Por lo tanto el valor mínimo es mayor en las bandas más cortas y va disminuyendo hacia el infrarrojo cercano y medio.

2.5.4.4.- Corrección geométrica o georreferenciación

Este concepto incluye cualquier cambio de posición que ocupan los píxeles de la imagen. A diferencia de las correcciones radiométricas, aquí no se pretende modificar el valor numérico de cada píxel del que está compuesta una imagen, sino solo su posición y sus coordenadas. Además por tratarse de un formato digital, esta transformación puede basarse en funciones numéricas, que permiten modificar muy flexiblemente la geometría de la imagen. La expresión general para este tipo de funciones es:

$$f(x)=f_1(c,r)$$

$$f(x)=f_2(0,r)$$

Esto es, las coordenadas X, Y de la imagen corregida está en función de las coordenadas c, r (columna, renglón) de la imagen de entrada. Esta transformación se emplea para corregir cartográficamente una imagen o para sobreponer dos o más imágenes entre sí. En el primer caso, se pretende transformar las coordenadas de la imagen en coordenadas cartográficas (UTM o geográficas), con el objeto de que la imagen resultante pueda sobreponerse sobre los mapas ya elaborados. En el segundo caso lo que se busca es ajustar dos o más imágenes entre sí, esto es con la finalidad de realizar estudios multitemporales.

Las modificaciones geométricas de una imagen pueden obtenerse de dos formas:

- La primera de ellas parte de la información ya disponible sobre las características orbitales del sensor. Esto permite que puedan corregir los errores sistemáticos, que son ocasionados por la rotación de la tierra o debido a la inclinación de la órbita del sensor. Pero como se trata de correcciones sistemáticas, estos pueden abordarse con escasa información sobre terreno, por lo tanto son idóneas para aquellas zonas en donde la cartografía disponible es escasa o inadecuada. Asimismo, son convenientes para el caso de los sensores de baja resolución (tipos AVHRR), en donde resulta muy difícil identificar algunos puntos comunes entre las imágenes y el mapa.

- La segunda corrección es un poco más empírica. Parte de una cartografía básica a la que se pretende ajustar a la imagen (en nuestro caso carta topográfica 1:50 000, INEGI) o bien de otra imagen que se considere como de referencia.
- *Establecimiento de los puntos de control.*- La localización de puntos comunes de la imagen y del mapa (o a otra imagen de referencia), también llamados puntos de control.

Las funciones que permiten transformar las coordenadas de la imagen al mapa precisan localizar una serie de puntos de control entre imagen y mapa. A partir de estos puntos, se puede estimar una función en donde nos relacione a ambas. La calidad del ajuste depende de la precisión con que se localicen dichos puntos. De lo contrario, la estimación de los puntos de control resultará errónea (desviada). En definitiva, el establecimiento de los puntos de control resulta ser la fase más importante en el proceso de corrección. Para que el ajuste, entre la imagen y el mapa sea correcto, se requiere tener en cuenta tres aspectos esenciales en la selección de los puntos de control:

- *Número.*- El número de los puntos de control depende del tamaño y complejidad geométrica de la imagen. Si las deformaciones que presenta son importantes, es conveniente aplicar funciones de transformación complejas, con polinomios de segundo grado y de tercer grado. Cuanto mayor sea el grado de la ecuación de ajuste, será necesario un mayor número de puntos de control. Matemáticamente solo son necesarios 3 puntos para la función de primer grado, 6 para uno de segundo y 10 para uno de tercer grado. En la práctica se determinan como mínimo 4 puntos de control para pequeñas áreas.
- *Localización.* En lo que respecta a la localización, es recomendable que sean rasgos claramente identificables, tanto en la imagen como en el mapa, que sean preferiblemente puntos no sujetos a modificación alguna como lo son: cruces de carreteras, presas, vías férreas, etc.

- *Distribución.*- Respecto a la distribución, es conveniente que los puntos de control se sitúen uniformemente sobre toda la zona que es abarcada por la imagen.
- *Cálculo de las funciones de transformación.*- El cálculo de las funciones de transformación entre las coordenadas de la imagen y las del mapa se realiza estableciendo una función matemática, que nos relacione las coordenadas de la imagen con las coordenadas del mapa. De esta forma, a partir de las coordenadas columna y renglón de cada pixel, se estiman las coordenadas X, Y de la imagen de salida, esquemáticamente esta transformación puede expresarse de la siguiente forma (Mather 1987):

$$S = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^{m-i} a_{ij} c^i r^j$$

de donde:

S = indica las coordenadas de ya corregida, que es estimada a partir de las coordenadas de la imagen de entrada (c,r).

M = el grado del polinomio de ajuste.

El caso más simple sería el de una ecuación lineal, en donde:

$$S_i = a_0 + a_1 c_i + a_2 r_i$$

O si bien se prefiere obtener las coordenadas del mapa:

$$X_i = a_0 + a_1 c_i + a_2 r_i$$

$$Y_i = b_0 + b_1 c_i + b_2 r_i$$

Como puede comprobarse, se trata de una regresión lineal múltiple, en donde:

a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 y b_2 = son los coeficientes de regresión.

c_i y r_i = las variables independientes.

X_i e Y_i = indican las variables dependientes.

En este caso, las variables independientes son las coordenadas, columna y renglón de la imagen, y las dependientes, o estimadas las coordenadas X,Y del mapa.

Se pueden establecer de igual forma dos ecuaciones:

$$c = f_0 + f_1x + f_2y$$

$$r = g_0 + g_1x + g_2y$$

Esto es, que se pueden estimar las coordenadas de la columna **C** y del renglón **R** de la imagen corregida a partir de las coordenadas UTM del mapa que se utilizó como referencia. Al igual que en la regresión convencional, estas funciones pueden definirse gráficamente por un plano, que expresa la rotación entre las coordenadas de las variables independientes (x e y) y la variable dependiente (eje z).

Desde el punto de vista práctico, conviene considerar que a una función lineal bastará aplicar unas transformaciones elementales de la imagen, como el cambiar escala y origen, su inclinación, modificar la relación entre sus ejes y rotarla.

- *Transferencia de los valores numéricos de los píxeles originales, a la posición corregida.*- Si se pretende crear una imagen que corresponda adecuadamente con las coordenadas del mapa, resulta necesario transferir, de alguna forma, los valores numéricos de cada píxel de la imagen original a esta nueva posición.

Idealmente, a cada píxel de la imagen ya corregida debería corresponderle un solo píxel de la imagen original. Lo normal es que no sucede así, sino que el píxel de la nueva imagen se sitúa entre varios píxeles de la imagen original, en este proceso se supone una alteración considerable en la geometría original de la escena.

La transferencia de los valores numéricos de cada píxel, a la imagen corregida se lleva a cabo por tres métodos:

- *Vecino más próximo.*- El primer método denominado vecino más próximo, consisten en situar en cada celdilla de la imagen corregida el valor numérico del pixel más cercano, de la imagen original. Esta es la solución más rápida y en donde se supone que es menor la transformación de los valores numéricos de los pixeles originales. El principal inconveniente que presenta este método radica en la distorsión que se introduce en los rasgos lineales de la imagen (fracturas, carreteras o caminos), que pueden aparecer en la imagen ya corregida como líneas quebradas.
- *Interpolación bilineal.*- Aquí se supone que se promedia los valores numéricos de los cuatro pixeles más cercanos en la imagen original. Este promedio se pondera según la distancia del pixel original al pixel corregido; tienen una mayor influencia los pixeles más cercanos al pixel de la imagen original.
- *Convolución cúbica.*- Este método considera los valores numéricos de los 16 pixeles más próximos. El efecto visual es más correcto, pero supone un volumen de cálculo más elevado.

2.5.5.- Clasificación digital de imágenes

El objetivo principal de la clasificación digital de imágenes es poder establecer cuantos pixeles son; suelo, agua, vegetación, cultivo, o cualquier otro rasgo de la zona que nos interese discriminar.

Para ello es primordial analizar los datos de la imagen, definir las clases y posteriormente aplicar una regla de decisión estadística o matemática con la cual la computadora pueda decidir a cuál clase va a asignar cada pixel. La teoría de la clasificación de imágenes en Percepción Remota se basa principalmente en el supuesto de que es posible distinguir los

objetos o fenómenos, en base a los patrones espectrales, espaciales o temporales que presentan los valores de las diferentes bandas.

2.5.5.1.- Reconocimiento de patrones

La clasificación digital de imágenes se puede dividir por el tipo de patrones con los que se trabaja. El objetivo de usarlos es encontrar formas, o relaciones que se repitan en el espacio geográfico. Un patrón, por ejemplo, es la forma característica de una parcela o de una presa. El tamaño, la forma, las relaciones espaciales con otros objetos nos ayudan a precisar estos patrones.

En el análisis digital los patrones se establecerán de acuerdo a la matriz de datos, buscando comportamientos relacionados con los píxeles ya sea considerándolos espectralmente, espacialmente o por su comportamiento temporal. Es por ello que podemos hablar de patrones espectrales, espaciales y temporales (Lillesand y Kieffer, 1994).

El método de identificación de patrones espaciales se relaciona estrechamente con las firmas espectrales, y está basado en la información de cada píxel, por separado, en cada una de las longitudes de onda que se analizan.

Las técnicas que utilizan los patrones espaciales se basan en las relaciones de cada píxel con los píxeles que lo rodean. De acuerdo a esto, nos interesa la textura, proximidad, tamaño de los objetos, formas, direcciones, frecuencia espacial, y el contexto. Este proceso de clasificación, por supuesto es más complejo e implica un uso intensivo de los recursos de cómputo, que el proceso anterior.

El reconocimiento de patrones temporales se basa principalmente del tiempo como uno de los elementos en la clasificación. Hay cambios estacionales en los cultivos, cuerpos de agua, tipos de vegetación. Con la comparación de las respuestas espectrales en dos fechas

distintas podemos separar por ejemplo; un pastizal de un campo de cultivo, vegetación caducifolia de la perennifolia.

2.5.5.2.- Clasificación no supervisada

Este método a diferencia del supervisado, se enfoca a definir las clases espectrales presentes en la imagen. No implica el tener algún conocimiento de la zona en estudio, por lo que la intervención de campo, no tiene un papel importante como apoyo, este método se centra más en la interpretación, que en la recabación de resultados.

Se asume que el valor numérico de cada pixel de la imagen forma una serie de agrupaciones o conglomerados más o menos nítidos según sea el caso. Estos grupos equivaldrían a los pixeles con un comportamiento espectral homogéneo y por lo tanto, con esto se definirán áreas temáticas de interés. El método para definir este tipo de agrupamientos espectrales, es muy similar al que se emplean en otras técnicas de clasificación automática de datos. Este método se basa en un triple proceso:

- *La selección de las variables que interviene en el análisis.*- En este caso, las variables son las bandas espectrales seleccionadas para la clasificación, ya sean las originales o las obtenidas de alguna transformación. En este caso las variables son los pixeles que componen la imagen, cada uno de ellos esta definido por los valores numéricos de cada pixel como de bandas que intervienen en el análisis. En este caso se trata de encontrar grupos de pixeles con valores numéricos similares, para posteriormente equipararlos con alguna de las clases informales de las leyendas.
- *Selección de un criterio para medir la similitud o distancia entre los casos.*- El método para encontrar los grupos homogéneos puede ilustrarse con el caso más simple, en el que se estuviera trabajando con dos bandas diferentes (infrarrojo cercano y rojo). En el gráfico bivariado aparecerán tantos puntos como pixeles, que son localizados de

acuerdo con su valor numérico en cada banda. El gráfico evidenciará la existencia de agrupaciones de píxeles, con valores numéricos similares en las dos bandas, con esto se podrán identificar las zonas temáticas de interés.

- *Selección de un criterio para agrupar los casos similares.*- La delimitación de cada grupo espectral se inicia señalando dos criterios importantes: uno que mida la similitud entre píxeles, y el otro que marque las condiciones del proceso de agrupamiento.

En la delimitación, se han propuesto muy diversos criterios para medir la distancia entre los píxeles. El más utilizado es el de la distancia Euclidiana:

$$D_{ab} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (Nd_{a,k} - ND_{bk})^2}$$

de donde:

D_{ab} = distancia entre dos píxeles cualesquiera a y b.

$ND_{a,k}$ y $Nd_{b,k}$ = indica los niveles digitales de esos píxeles en la banda.

K y m = el número de bandas.

En cuanto al algoritmo de agrupamiento, las operaciones que se realizan son muy numerosas. Uno de los algoritmos más empleados es el denominado ISODATA (Técnica Iterativa Autoorganizada de Análisis de Datos). Esta técnica es iterativa por que hace la repetición de un mismo proceso varias veces y es autoorganizada, además requiere de la mínima participación del usuario en la formación de campos de entrenamiento.

En esencia este algoritmo procede de la siguiente manera:

1. Se señalan una serie de centros de clase, de acuerdo al número y forma, estos son indicados por el usuario.
2. Se asignan todos los píxeles de la imagen al centro de clase más próximo.
3. Se calculan nuevamente los centros de clase, teniendo en cuenta el valor numérico de

todos los píxeles que se le hayan incorporado en la fase anterior.

4. Se vuelve a asignar a todos los píxeles de la imagen al centro más cercano, el cual debido al desplazamiento en (3), no tienen por que coincidir con la anterior asignación realizada en (2).
5. Se vuelven a calcular los centros de clase, teniendo en cuenta las nuevas incorporaciones y se retorna al inciso (4).

Este proceso se repite iterativamente hasta que el centro de clase no se desplace significativamente, lo que significa un buen ajuste de todos los grupos presentes en la imagen.

Desde el punto de vista estadístico, este algoritmo parece bastante adecuado para delimitar grupos con valores homogéneos dentro de la imagen. Sin embargo, en ocasiones resulta engañoso señalar unos parámetros de control significativos, puesto que en general los usuarios no conocen de partida, el número de grupos espectrales que están presentes en la imagen, ni el valor idóneo de la dispersión interna o de la distancia entre los grupos.

De esta manera, el análisis no supervisado se convierte en un proceso iterativo, en donde los usuarios establecen valores arbitrarios que se van a ir modificando en función de los resultados.

Como se trata de un procedimiento iterativo, el algoritmo ISODATA no sesga los resultados hacia la parte superior o hacia la parte inferior de la imagen, tal como ocurre con otros métodos, sin embargo es más lento que los demás ya que el número de repeticiones puede ser muy grande.

En este sentido, la clasificación no supervisada puede considerarse meramente como exploratoria, dirigida principalmente a reducir las clases espectrales presentes en la imagen. Bastará, para ello realizar los cálculos sobre una muestra sistemática de los píxeles del cual

esta compuesta la imagen, o sobre una serie de ventanas seleccionadas por el usuario, con esta operación se agiliza notablemente los cálculos.

2.5.5.3.- Clasificación supervisada

Las técnicas de clasificación supervisada comprenden procedimientos que se extienden desde los basados en la partición del espacio espectral en regiones-clases a los basados en el cálculo de las probabilidades.

Los pasos que generalmente se hacen al aplicar este tipo de procedimientos son:

- Decidir los tipos de cobertura del terreno que deseen estudiarse (clases de información).
- Elegir los píxeles de entrenamiento que representan a cada clase.
- Usar dichos píxeles para estimar los parámetros del clasificador que se va usar.
- Utilizando el clasificador elegido, asignar a cada píxel de la imagen, a cada uno de los tipos de cobertura deseados.
- Producir mapas temáticos en donde estén plasmados los resultados.

En una clasificación temática suelen distinguirse dos tipos de clases; las informacionales y las espectrales (Chuvienco, 1986). Las primeras son las que constituyen la leyenda de trabajo que pretende deducir al interprete las clases a trabajar, por ejemplo los tipos de ocupación de suelo, este tipo de categorías las establece el usuario. Las segundas corresponden a los grupos de valores espectrales homogéneos que están presentes dentro de la imagen, en función de ofrecer una reflectividad similar, para las bandas consideradas y en la fecha concreta de la imagen, estas categorías se deducen de los niveles digitales presentes en la imagen.

En el método supervisado, se parte de tener un cierto conocimiento de la zona en estudio, adquirido por una experiencia previa o por los trabajos realizados en campo.

El tener mayor familiaridad con la zona en estudio, fácilmente el interprete podrá delimitar sobre la imagen las áreas de interés, que se puedan considerar suficientemente representativas de las categorías en que esta compuesta nuestra área de trabajo. Estas áreas se conocen como campos de entrenamiento. Estos campos de entrenamiento deben incluir todas las clases que deseamos distinguir.

Los trabajos de campo y otros documentos auxiliares (fotografías aéreas o la cartografía convencional), son de gran ayuda para tener una localización más precisa de nuestras áreas de interés, se debe tomarse en cuenta que deben tratarse de ejemplos lo suficientemente representativos y homogéneos de la clase que se pretenda definir.

Este proceso es una forma muy peculiar de muestreo espacial. Por lo tanto, es conveniente tomar en cuenta algunos de los criterios, habilidades en este tipo de técnicas para poder elegir el tamaño y la distribución más idónea de la muestra, así como también para poder realizar estimaciones a partir de ella.

En lo que respecta a la distribución, conviene tener en cuenta las características propias de la imagen, intenta abarcar las variaciones espaciales que se presentan en cada categoría: su orientación, pendiente, densidad, vigor, contenido de humedad, tipo de suelo, etc. En este sentido, se ha subrayado que la variabilidad de una cubierta es directamente proporcional a la resolución del sensor.

La selección de los campos de entrenamiento suele hacerse directamente sobre la pantalla de la computadora y pueden elegirse varios campos de entrenamiento para una clase informativa.

Cuando se han escogido las áreas de entrenamiento, la computadora genera las estadísticas de cada clase, calculando la media, desviación estándar, y otras estadísticas, utilizando todos los pixeles que se escogieron como muestras, y para todas las bandas que se

seleccionaron para hacer la clasificación. Como resultado de este proceso se obtiene la firma espectral de cada clase.

Los principales métodos de la clasificación supervisada son:

- *Método de mínimas distancias.*- Mediante los píxeles de entrenamiento se estiman los vectores de cada clase. Sean m_1, m_2, \dots, m_n , dichas estimaciones, elegido un píxel X de la imagen y hallada la distancia euclidiana desde él a cada uno de los centros anteriores, el píxel se asigna a la clase cuyo centro está más próximo a él, pero si se hallará a una distancia superior a la distancia crítica no será clasificado. Por lo tanto con este método pueden quedar píxeles sin clasificar.
- *Método del paralelepípedo.*- Con los valores máximo y mínimo en cada banda de los píxeles de entrenamiento de cada clase, se definen paralelepípedos de aristas paralelas a los ejes espectrales. Si durante la clasificación un píxel cae dentro de una de esas cajas, el píxel es clasificado en la clase que le corresponde.

Uno de los inconvenientes de este proceso, es que pueden producirse huecos entre los paralelepípedos y los píxeles que caigan en ellos quedarán sin clasificar, o incluso pueden producirse solapamientos de paralelepípedos, en cuyo caso los píxeles no podrán separarse.

- *Método de máxima probabilidad o de máxima verosimilitud.*- Este clasificador es sin duda el más usado, aunque a la vez el más complejo. Teóricamente, es más sólido que los dos anteriores y se adapta mejor a la distribución espacial de los datos. Este método evalúa numéricamente tanto la varianza como la covarianza de los patrones de la respuesta espectral de cada categoría, al clasificar un píxel desconocido.

Dado un vector pixel X y un conjunto de clases w_1, w_2, \dots, w_n , según el teorema de Bayes la probabilidad de que dicho pixel pertenezca w_i es:

$$P(w_i|X) = \frac{P(w_i)P(X|w_i)}{\sum_{j=1}^M P(w_j)P(X|w_j)}$$

De donde:

$P(w_i|X)$ = la probabilidad de que dado un pixel X , éste pertenezca a la clase w_i (probabilidad a posteriori).

$P(w_i)$ = la probabilidad de obtener la clase w_i en la imagen (probabilidad a priori).

$P(X|w_i)$ = la probabilidad de obtener el pixel X en la clase w_i (verosimilitud).

2.5.5.4.- Método de Muestreo para la verificación de los datos

El diseño y desarrollo del muestreo es la parte principal en el proceso de verificación de los datos. En este caso el muestreo espacial nos sirve para seleccionar una pequeña parte del área en estudio, a manera que sea lo suficientemente representativa de la zona trabajada.

Existen cinco tipos de muestreo (aleatorio simple, aleatorio estratificado, sistemático, sistemático no alineado, y por conglomerados), en donde se deben de tomar en cuenta una serie de factores que influyen en la obtención del resultado: método de selección de la muestra, tamaño y distribución de la misma, y el nivel de confianza otorgado a la estimación (Chuvienco, 1986).

Las técnicas de muestreo más utilizadas en el proceso de verificación son:

- *Aleatorio simple.*- En este caso todos los elementos a verificar se eligen de manera aleatoria, por lo tanto todos tienen la misma probabilidad de ser seleccionados y que la

elección de un elemento no influya en la del siguiente. Debido a este carácter probabilístico, este tipo de muestreo es el más sólido estadísticamente, el único inconveniente que presenta es que da problemas en su aplicación espacial, debido a los costos elevados de desplazamiento entre cada muestra.

- *Aleatorio estratificado.*- La muestra se realiza dividiendo la población en regiones o estratos, de acuerdo a una variable auxiliar (altitud, geología, etc). Este tipo de muestreo es más complejo de diseñar que el anterior, pero aporta información complementaria sobre sub-conjuntos de la población, además de reducir el error de la muestra siempre y cuando la variable auxiliar se elige correctamente.
- *Sistemático.*- La muestra se distribuye en intervalos regulares, a partir de un punto de origen señalado aleatoriamente. Este método garantiza un muestreo completo de la zona a verificar, pero puede facilitar estimaciones erróneas si existe algún tipo de patrón periódico en el área observada (geometría de las parcelas).
- *Sistemático no alineado.*- Modifica el esquema anterior, gracias a variar aleatoriamente una de las dos coordenadas. Esto nos permite introducir una cierta aleatoriedad en la elección de la muestra, mientras reduce el sesgo debido a la periodicidad. Por otra parte se sigue, garantizando una revisión completa de toda la zona.
- *Por conglomerados.*- Se selecciona como unidad de muestra un grupo de observaciones, denominado conglomerado (campos de entrenamiento), en lugar de individuos aislados. En otras palabras, en cada punto a verificar se toman varias muestras, en puntos vecinos al elegido aleatoriamente y de acuerdo a un esquema prefijado. Este método de muestreo reduce los costos de transporte, pero resulta mucho más complejo y, normalmente, menos preciso que los anteriores.

2.6.-Técnicas de fotointerpretación en las imágenes

Mientras que el tratamiento digital se basa, principalmente en la intensidad radiométrica de cada pixel, el análisis visual se basa en otros elementos como lo son la textura, el tono, el color, la forma, el tamaño, etc.

Estos criterios anteriormente mencionados nos permiten discriminar categorías con un comportamiento espectral homogéneo, aunque con un significado temático distinto.

Los principales criterios que se utilizan en Percepción Remota para la identificación de los rasgos en las imágenes de satélite son similares a los que se emplean en la interpretación de las fotografías aéreas convencionales:

2.6.1.- Textura

Esta cualidad se refiere a la variación, distribución y frecuencia de las tonalidades. La textura de la imagen de satélite procede de la relación entre en tamaño de los objetos que son captados por el sensor y la resolución de este, mientras más pequeña sea la escala de la imagen, más fina será la textura (tono más uniforme).

En función del tamaño de los objetos se distinguen los diferentes tipos de texturas los cuales son las siguientes:

- Textura gruesa.- cuando los objetos están comprendidos entre 0.25 y 1.00 mm² a escala de la imagen.
- Textura mediana.- son objetos comprendidos entre 0.04 y 0.25 mm²
- Textura fina.- son los objetos inferiores a 0.04 mm²

2.6.2.- Tono

El tono hace referencia a la intensidad de energía recibida por el sensor para una determinada banda del espectro. En un producto fotográfico como en nuestro caso, los pixeles con tonos oscuros indican aquellas áreas donde el sensor detecto una señal muy baja, mientras que en las zonas claras son testigo de valores de radiancia. Los tonos, sobre todo de vegetación estarán también en función de la época de la toma de las imágenes (estación del año).

Los objetos que se pueden identificar en la imagen de satélite por su tono claro u oscuro, son:

- El lecho de un arroyo sin agua se observa de tono claro, esto es debido a que las arenas, piedras o la superficie sin vegetación refleja más luz. Un arroyo que conduce agua se observa de tonos claros u oscuros, esto es debido al ángulo de incidencia de la luz en el agua.
- Una zona cubierta con árboles o con follaje se observa de un tono oscuro, esto es debido al color verde de la vegetación y al amontonamiento de los árboles, y con escasa vegetación, como lo son los arbustos o pastizales se observaran de un tono más claro.
- Los límites de parcelas (linderos) pueden identificarse por su tono oscuro si estos están definidos por canales que llevan agua, o bien si tienen barreras de árboles o arbustos sobre sus límites.

2.6.3.- Color

Como es sabido, el color que aprecian nuestros sentidos es fruto de la reflectividad de los objetos en las diferentes longitudes de onda. Aquellas superficies con mayor reflectividad en longitudes de onda corta, y baja en el resto, aparecerán en color azul, mientras se aprecian de un tinte rojo si absorben las longitudes cortas y reflejan las largas. El ojo

humano solo percibe longitudes de onda comprendidas entre 0.4 y 0.7 m, separando la energía que recibe en tres componentes (son los denominados colores primarios azul, verde y rojo, a partir de los cuales se puede construir cualquier color del arco iris) de acuerdo a la sensibilidad espectral de nuestras células sensoras.

En una imagen de satélite en falso color se puede observar una gran variedad de tonalidades y colores, los cuales pueden utilizarse para interpretar la imagen. Las tonalidades más habituales que se presentan en una imagen (las combinaciones en RGB más habituales son; 321, 753, 531, 742, etc), nos sirven para identificar e interpretar algunas cubiertas de interés como lo son las siguientes:

- *Rojo-magenta.*- Esta tonalidad es muy utilizada para la elaboración de cartas temáticas, puesto que denota una vegetación vigorosa, como lo son cultivos regados, pastizales, vegetación densa de bosques verdes. El estudio detallado de la intensidad y de la saturación del rojo, permite identificar diversas cubiertas vegetales, así como de estimar su ciclo de crecimiento.
- *Rosa.*- Muestra áreas vegetales menos densas o su vegetación se encuentra en estado de crecimiento.
- *Blanco.*- Muestra áreas de escasa o nula vegetación, donde es máxima la reflectancia (nubes, zonas arenosas, depósitos salinos, canteras, etc.).
- *Azul Oscuro a Negro.*- Nos muestra superficies cubiertas parcial o totalmente por agua: como lo son: los ríos, canales, lagos, lagunas, embalses.
- *Gris a Azul Metálico.*- Esta tonalidad nos muestra las grandes ciudades o áreas urbanas, pero puede confundirse con rocas desnudas.
- *Café.*- Vegetación caducifolia en época en que no presenta follaje verde.
- *Café Claro-dorado.*- En esta tonalidad podemos identificar zonas de transición como: prados secos, matorral ralo, parcelas de temporal sin cultivo.

2.6.4.- Formas

La forma o figura de los objetos en las imágenes que son registradas por el sensor en el momento de la toma, nos permiten reconocer elementos individuales en la imagen, como lo son; los complejos industriales o aeropuertos, y algunas estructuras geológicas bien definidos como: volcanes, domos, escurrimientos, o lineamientos.

Para poder identificar las formas de los objetos o rasgos, se requiere de tener un previo conocimiento de ellos, para poder imaginar la forma de como se observan éstos desde arriba y no desde perfil.

2.6.5.- Otras técnicas

- *Tamaño.*- Este criterio está relacionado con el área y el volumen, la escala de la imagen debe ser tomada en cuenta para poder estimar el tamaño real de los objetos. El tamaño de un objeto es uno de los factores más útiles para su identificación. A través de la medida de un objeto desconocido en la imagen, el interprete puede eliminar varias consideraciones al respecto de todos los grupos posibles a identificar.
- *Sombras.*- Las sombras en la imágenes son el resultado de la iluminación oblicua del sol, en la superficie terrestre, en el instante de la toma de la imagen. En este criterio se depende mucho de la fecha de adquisición de la imagen y del relieve local. Nos permite realzar la interpretación de los rasgos geomorfológicos, y de la textura especialmente en zonas forestales.
- *Contorno.*- Con este criterio se nos facilita el reconocimiento de algunos rasgos particulares, como es el caso de las autopistas, vías de ferrocarril, los ríos, canales, etc.

CAPÍTULO III.- TÉCNICAS PARA EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL IMPACTO DE OBRAS DE INFRAESTRUCTURA CARRETERA.

Se propone la aplicación de técnicas en continuo avance como el procesamiento digital de imágenes y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el estudio de obras de infraestructura carretera. Se procesa: la imagen SPOT en la modalidad Pancromática, la imagen LANDSAT TM, las fotografías aéreas y de diversa información cartográfica¹, para analizar la evolución del Uso del Suelo en la zona poniente del D.F. que es afectada por la traza de la nueva autopista La Venta-Lechería.

Con esto se analiza la posible relación que existe entre la construcción de nuevas vías de comunicación y el aumento de la mancha urbana.

Antecedentes

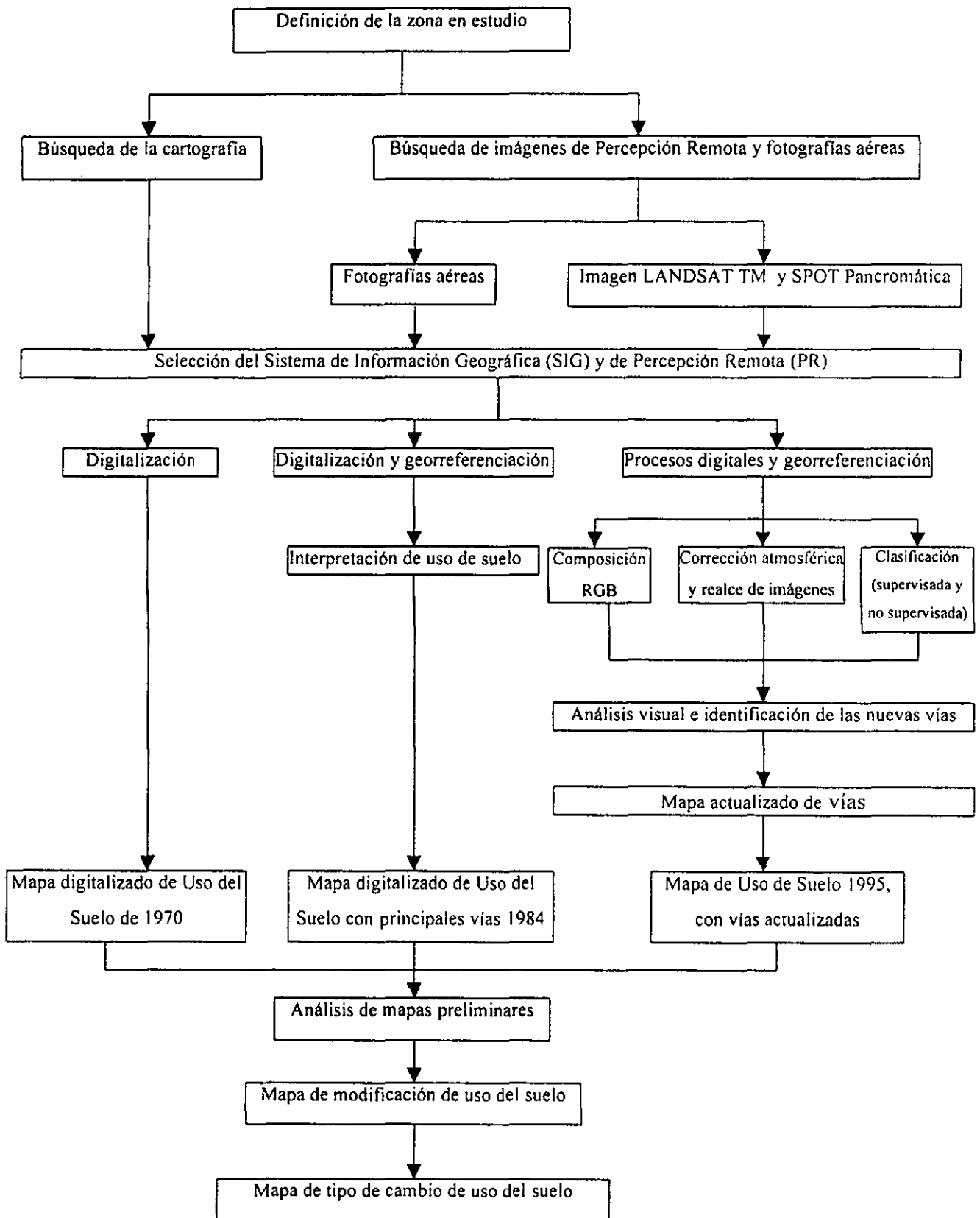
Entre las aplicaciones más frecuentes en el procesamiento digital de imágenes se encuentra la generación de la cartografía relacionada con la identificación y estado de las diferentes cubiertas del terreno. Estas son diferenciadas con base a su respuesta en las distintas porciones del espectro electromagnético y clasificados a partir de sus afinidades.

Actualmente los datos obtenidos por los satélites son la primera fuente de información para la actualización de la cartografía de un país, ya que estos dan mayor libertad y más posibilidades para el análisis y la solución de problemas relacionados con el estudio de la superficie terrestre, dado el gran ahorro en tiempo que implica su uso. Además, los datos del sensor permiten analizar información geográfica de cubiertas de interés, con una resolución tan buena que permite identificar características y detalles topográficos que son importantes para la elaboración de mapas temáticos a distintas escalas.

¹Cartas topográficas escala 1:50 000, INEGI y mapas de carreteras escala 1:250 000, SCT.

El INEGI firmó con Cosmocolor (empresa representante de Spot Image en México) un contrato para adquirir más de 1600 imágenes captadas por SPOT, de las cuales 700 son escenas Pancromáticas que fueron tomadas entre 1994 y 1995, en donde hacen el cubrimiento de todo el territorio nacional. Estas imágenes se usarán para la actualización de las cartas topográficas escala 1:50,000 de toda la república mexicana, que forman parte del proyecto de modernización de las actividades geográficas del INEGI relacionadas con la tecnología digital.

Esquema metodológico del proyecto:



3.1- Definición de la zona en estudio

El área en estudio comprende cuatro municipios conurbados (Huixquilucan, Naucalpan, Atizapan de Zaragoza y Cuautitlán Izcalli) de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCD) y una delegación del D.F. (Cuajimalpa de Morelos), cuya infraestructura vial y de servicios de transporte tiene una gran vinculación e interacción con el sistema de transporte del Distrito Federal.

En esta zona se estudia la evolución del uso del suelo en la zona Poniente de Ciudad de México, sobre la traza de la autopista La Venta-Lechería, que comprende la zona poniente del D.F. en la parte norte desde el entronque con la autopista México-Queretaro hasta la intersección con la autopista México-Toluca.

3.2.- Búsqueda y captura de la información

El seguimiento del esquema metodológico nos indica la búsqueda de la información cartográfica, de fotografías aéreas y de imágenes de Percepción Remota que se emplearán en el proyecto.

Cartografía de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

Se buscaron las cartas que abarcaran la zona en estudio, con lo cual se integraron en este proyecto una serie de mapas básicos (topográficos) y temáticos (de uso de suelo), editadas por el INEGI, escala 1:50,000 (E14A29 "Cuautitlán" y la E14A39 "Ciudad de México"), que cubren la Zona Metropolitana de Ciudad de México (ZMCM). En esta sección se hará la digitalización del mapa de Uso Suelo y de Vegetación para su posterior comparación y evaluación, con el obtenido en los procesos digitales.

Con la Cartografía existente se define la escala de trabajo y el tipo de mapas que se utilizarán en el proyecto, se emplean las cartas topográficas y temáticas (uso de suelo) de la ZMCM, escala 1:50, 000, elaboradas en 1970 por el INEGI, debido a que es la única cartografía que se tiene de la zona. Con estas cartas se obtiene el uso del suelo de esa época y posteriormente se hará una comparación con la obtenida con las imágenes de satélite y las fotografías aéreas para evaluar la posible modificación.

Fotografías aéreas de la zona poniente de la Ciudad de México

Para hacer la identificación y delimitación de las unidades de uso de suelo de 1984, se contó, con fotografías aéreas escala 1: 75 000 del vuelo SINFA, que abarcan la zona en estudio. Con estas fotografías se realizó un reconocimiento e identificación de las unidades de uso de suelo, clasificándolas de acuerdo a la nomenclatura utilizada por el INEGI.

Estas fotografías aéreas son seleccionadas de un mosaico fotográfico, en donde se ubica la línea de vuelo, el número de fotografías ha emplear. Las fotografías aéreas a utilizar son escala 1: 75 000, en dirección Norte-Sur o Sur-Norte, con un sobreposición longitudinal del 60% y lateral del 30%.

Ya digitalizadas y corregidas geométricamente, se hace la interpretación del uso del suelo de las distintas fechas que se utilizaron (Febrero 1984, vuelos de la DGG y Febrero 1994, vuelos SINFA), escala 1:75,000. Con esto se obtienen dos mapas de uso del suelo que sirven de base para hacer la comparación con las cartas digitalizadas previamente.

Imágenes de satélite que cubren la zona poniente de la Ciudad de México

Para la actualización de la carta de Uso de Suelo se presenta el problema, de la gran diversidad de información a manejar y por esto se hace necesario aplicar diferentes pasos metodológicos que nos permitan realizar esta actividad de manera eficiente.

Primero se realiza la búsqueda de las imágenes que se emplean en el proyecto en los diferentes catálogos existentes y, en los bancos de datos que manejan imágenes en Percepción Remota o imágenes digitales.

Las imágenes que cubren la zona por trabajar son: LANDSAT TM (con seis bandas; 1, 2, 3, 4, 5 y 6) y la imagen SPOT Pancromática, de Octubre de 1991 y Octubre de 1995, respectivamente que abarcan gran parte de la ciudad de México.

Se selecciona la imagen SPOT de 1995 debido a la resolución espacial (10 metros), ya que en esta modalidad se pueden identificar rasgos de nuestro interés (vías de comunicación, centros comerciales, etc.) y además de que se observa la vía en estudio.

Con las siete bandas del sensor TM se hará una clasificación digital, con lo cual obtendremos el mapa de uso de suelo, este mapa se hará de acuerdo a la respuesta espectral de la zona por trabajar.

Sé empleo la imagen SPOT Pancromática de la Ciudad de México, de Octubre de 1995 y la imagen LANDSAT TM de 1991. Ya corregidas geoméricamente, se integran a la fotografía aérea digitalizada, para hacer la interpretación de uso del suelo actual. La modalidad SPOT MSS no se empleo en este estudio, debido a que no existe ninguna toma multiespectral reciente de la ZMCM que nos fuese útil para el proyecto.

Como resumen final de esta búsqueda, esta el siguiente material a procesar:

- Fotografías aéreas
- Imagen SPOT Pancromática:

Esquina	Latitud (N)	Longitud (W)
NW	19° 49' 38"	99° 27' 00"
NE	19° 44' 04"	99° 52' 35"
SW	19° 17' 53"	99° 34' 54"
SE	19° 12' 20"	99° 00' 36"

- Imagen LANDSAT TM: PATH²=26/ROW³=47
- Cartas: topográficas y temáticas (E14A29 y E14A39)

3.3.- Selección del SIG y el Software para el procesamiento digital de imágenes

El mundo real es complejo, heterogéneo y cambiante. Su descripción hay que hacerla en términos de modelos. Los Sistema de Información Geográfica (SIG) son modelos simplificados del mundo real, para estos se establece como unidad básica la entidad, que es definida por sus atributos y relaciones.

Se define el Sistema de Información Geográfica (SIG) y el de procesamiento digital de imágenes para procesar la información que se obtuvo, del material cartográfico y de Percepción Remota que nos sirve para evaluar la modificación en el uso del suelo.

En este estudio en particular los Software que se emplearon para la exploración y evaluación del cambio de uso de suelo se empleó el Sistema de Información Geográfica (SIG) ILWIS (ITC, 1992) y paralelamente se realizó el procesamiento digital en PIXSAT. Ya que ILWIS este sistema combina un módulo de Información Geográfica (SIG) con un módulo de sensores remotos, en este módulo se pueden ejecutar varias técnicas para el procesamiento de imágenes tales como: realce, corrección geométrica, composición de color, clasificación, etc., este es el SIG que se empleó en el proyecto y PIXSAT se empleó para hacer procesamientos digitales que no se pueden realizar en ILWIS, PIXSAT es un sistema para el procesamiento digital de imágenes que funciona en cualquier computadora PC, este sistema al igual que los otros está diseñado de manera modular, además de ser de creación mexicana.

² Pase orbital, numerada a partir del pase 001, hacia el Oeste.

Como en cualquier sistema de información, un sistema de imágenes consta de tres unidades las cuales son: la unidad de entrada, la unidad de proceso y la unidad de salida, en lo que se refiere al hardware, a esto hay que añadirle el sistema operativo que va a ser el responsable de gestionar los recursos de la máquina, de la interfaz con el usuario y de las entradas y salidas del sistema, este a cuanto software básico se refiere.

Para poder evaluar la transformación del uso del suelo y del avance de la mancha urbana, debido a la construcción de nuevas vías de comunicación, se emplea el SIG (ILWIS) y el sistema de procesamiento digital de imágenes PIXSAT. Con estos sistemas se llevan a cabo los distintos procesos que se les hará a las imágenes así como de la digitalización, para el posterior análisis de los resultados.

3.4.- Captura de la información

Con el gran desarrollo de la informática y del software para el tratamiento digital de imágenes, surgió la posibilidad de realizar procesos no solo desde la tableta sino desde el monitor, sobre copias digitales (conseguidas previamente por medio de un scáner), que son visualizadas en la pantalla del monitor.

Tableta Digitalizadora

La captura de la información por este medio es la forma más rápida y quizá la menos costosa de capturar información gráfica, ya sea para la elaboración de un mapa y/o para su actualización.

La gran desventaja que se tiene al capturar información por este medio, es que se depende totalmente del pulso del usuario, sus conocimientos técnicos, estado de ánimo y la calidad del equipo utilizado.

³ Fila, numerada hacia el Sur, comenzando por la latitud 80°

La tableta digitalizadora se debe usar únicamente como una herramienta de referencia para actualizar información cartográfica ya que la información que se obtiene no es muy precisa, por lo que se recomienda que este método de captura sea el mínimo posible.

Cuando se requiere realizar un trabajo por este método, se deberá asegurar que el operador responsable de esta tarea cuente con los elementos y conocimientos técnicos para llevarlo a cabo. En la práctica es recomendable, que al finalizar una sesión, el operador no deje inconclusa la digitalización de un rasgo. Por este medio se digitalizó las cartas de Uso de Suelo que fueron elaboradas por el INEGI en 1970, para su posterior comparación con la del Uso de Suelo Actual.

Por Computadora

Este es el método que actualmente se está utilizando para la extracción de rasgos geográficos en las empresas que se dedican a generar información geográfica digital, y consiste básicamente en extraer la información directamente de una ortofoto digital o imagen de satélite, identificando cada uno de los rasgos y para ser trazados con el Mouse, al que se le ha asignado previamente un identificador.

En nuestro caso la computadora realizara una clasificación automática con los variables que previamente les asignaremos, obteniendo con esto un mapa de Uso del Suelo actual.

3.5.- Procesamiento digital

Una imagen digital es la caracterización numérica de la energía radiante que proviene de la escena en estudio. La extracción de la información a partir de la imagen digital es vital para entender el comportamiento de la escena, de aquí que la Percepción Remota se base fundamentalmente en el procesamiento digital de imágenes.

3.5.1.- Secuencia Metodológica

De la imagen original se extrajo un segmento, en donde estaba contenida el área por trabajar. Como primer paso se hará el corte de la imagen LANDSAT TM (950L x 750C) de la ZMCM para no trabajar con la imagen completa (5965L x 6967C), esto nos ayudara a reducir los procesos de computo.

Se ubicaron en promedio 13 puntos de control por cada imagen que estuvieran distribuidos a lo largo de la imagen (SPOT P. y LANDSAT TM), los cuales fueron, en general, sitios que podían ser identificados con cierta facilidad (intersecciones o cruces de calles) tanto en la carta como en la imagen para hacer la corrección geométrica (georeferencia al sistema UTM) de una banda, para posteriormente hacer las demás bandas, este mismo procedimiento se aplicara a la imagen SPOT.

Las imágenes fueron corregidas geoméricamente, con base a las coordenadas UTM de los 13 puntos extraídos de la carta topográfica escala 1:50, 000 del INEGI. El valor de sigma para la corrección geométrica fue de 0.6 pixeles de error en la ubicación de coordenadas.

Como resultado de este proceso obtuvimos seis archivos corregidos geoméricamente, para su posterior tratamiento digital.

Posteriormente se procederá a obtener el análisis de componentes principales, este proceso se lleva a cabo para definir solo tres bandas del sensor TM (B1, B2, B3, B4, B5, B7), de las seis que forman toda la escena, con el fin de optimizar los procesos de análisis; en esta primer etapa arrojo como resultado los siguientes datos (ver tabla 1).

Los valores correspondientes a los eigenvectores nos permiten seleccionar las bandas más representativas para realizar las clasificaciones espectrales (no supervisada y supervisada).

	COMP. 1	COMP. 2	COMP. 3	COMP. 4	COMP. 5	COMP. 6
% VAR	73.89	17.91	5.18	2.14	0.79	0.10
B1	0.385	0.646	-0.086	-0.155	-0.598	-0.212
B2	0.238	0.273	-0.102	-0.006	0.141	0.916
B3	0.426	-0.312	-0.201	0.052	0.749	-0.341
B4	0.302	-0.320	-0.566	0.654	-0.238	-0.005
B5	0.696	-0.539	0.245	-0.400	-0.071	0.015
B7	0.192	0.129	0.749	0.621	-0.006	0.000

Tabla 1.- Eigenvectores correspondientes a los seis componentes principales de la escena.

Se generaron imágenes correspondientes a los tres primeros componentes principales, las cuales fueron derivadas de las seis bandas disponibles. Donde al primer componente principal (COMP. 1) se le asignó el color rojo, al segundo (COMP. 2) el verde y por último al tercero (COMP. 3) el azul (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 1). Esta composición RGB se hace debido a que sobre esta se interpreta áreas de vegetación, cuerpos de agua, pastizales, etc., sin que nos afecten las sombras orográficas.

También se genera una composición en color de las bandas 5, 3, 1 para poder identificar vías principales y rasgos de interés (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 2).

Se obtiene el Índice de Vegetación Normalizado (IVN), que es una operación entre dos bandas, que son el infrarrojo medio y el rojo (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 4), mediante la siguiente fórmula:

$$IVN = \frac{TM7 - TM3}{TM7 + TM3} (255)$$

Notación: TM7 y TM3 = banda 7 (infrarrojo medio) y la banda 3 (visible) del sensor TM.

Esta fórmula nos permitirá discriminar mejor las diferentes cubiertas a trabajar como la vegetación y los cuerpos de agua, además reduce los errores que se presentan por los efectos de la sombra.

Es necesaria hacerle un reescalamiento (pues se requiere que el rango este de -1 a 1) a la imagen ya que los valores obtenidos serán números reales entre menos uno (-1) hasta uno (1), por lo que se debe multiplicar por un factor de reescalamiento, en nuestro caso se multiplico por 255.

Una vez que se ha obtenido el Índice de Vegetación Normalizado (IVN), se hará la composición RGB con; el IVN, la banda 4 y la banda2 (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 3).

Posteriormente se hará una clasificación no supervisada la cual nos servirá de apoyo para detectar algunas clases específicas y que podríamos omitir en la clasificación supervisada.

En la clasificación no supervisada, la computadora no conoce que clases de pixeles va a clasificar, ni que clases forma. Es común que el programa solo requiera que le digamos; cuál imagen va a clasificar, cuantas bandas va a considerar, cuántas clases queremos obtener, cuál algoritmo vamos a emplear (Ver figura 3).

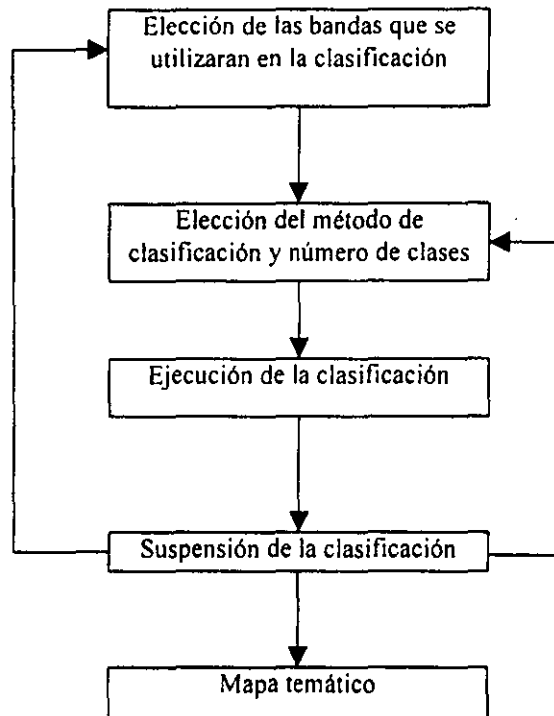


Figura 3.- Diagrama de la clasificación no supervisada

Posteriormente, apoyados con la clasificación no supervisada y de la composición RGB de los tres primeros componentes principales de las 6 bandas originales, se determinan las áreas de entrenamiento (Clusters) más adecuadas para realizar una clasificación supervisada.

Existen muchos algoritmos que utilizan la técnica de campos de entrenamientos para determinar los grupos espectrales naturales en un conjunto de datos, los más usados son; el de K-MEDIAS y el ISODATA.

La definición de las áreas de entrenamiento, para la realización de la clasificación supervisada suele hacerse directamente sobre la pantalla de la computadora y pueden elegirse varios campos para una clase(Ver figura 4).

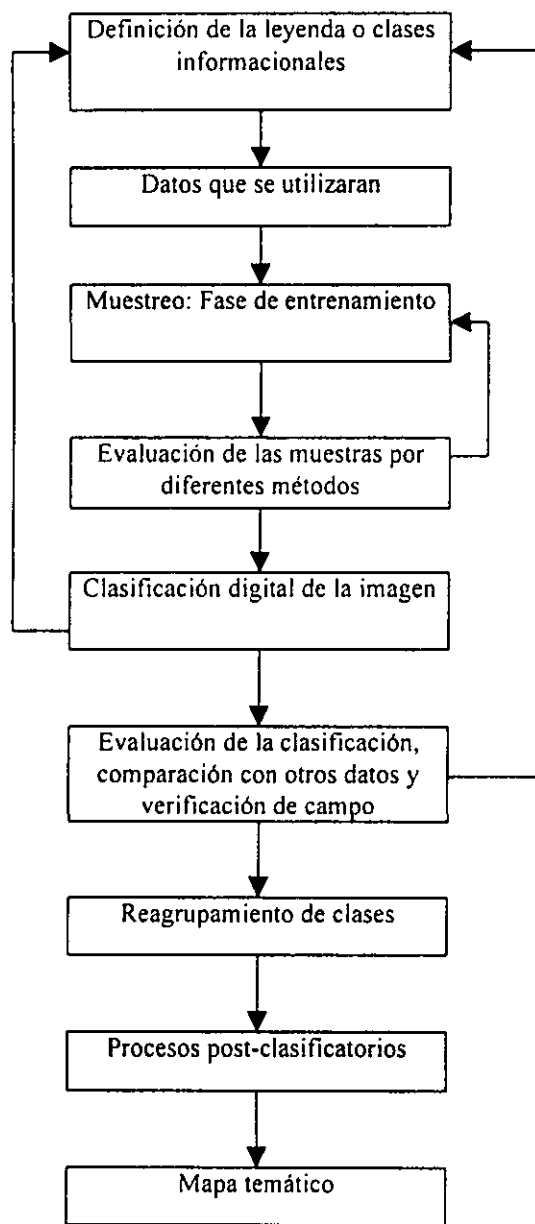


Figura 4.- Diagrama de la clasificación supervisada

En este método, es necesario analizar los píxeles que están incluidos en cada grupo, para poder obtener sus medidas estadísticas elementales. Cuando se han escogido las áreas de entrenamiento, la computadora genera las estadísticas de cada clase, calculando la media, desviación estándar, y otras estadísticas, utilizando todos los píxeles que se escogieron en las muestras, y para todas las bandas que se seleccionaron para hacer la clasificación. Como resultado de este proceso se obtiene una firma espectral para cada clase.

Se obtendrán a partir de la composición anterior los campos de entrenamiento, con las áreas más homogéneas para cada clase. Como por ejemplo; vegetación densa (bosques o selvas), cuerpos de agua (presas), agricultura (temporal o de riego), matorral, pastizal, suelo desnudo, sin clasificar.

Una vez que se han obtenido los campos de entrenamiento, se obtienen las firmas espectrales de cada una de las clases, verificando que sean perfectamente discriminadas a partir de las de las bandas utilizadas. Con las áreas de entrenamiento que se obtuvieron se recurrirá a una clasificación supervisada por el método de máxima verosimilitud.

Posteriormente a la imagen obtenida se le aplica un filtraje de media, esto con el fin eliminar el efecto de sal y pimienta o confeti. Los resultados obtenidos deberán ser verificados en campo con las técnicas de muestreo.

Una vez realizada la clasificación supervisada de la imagen, es necesario evaluar la precisión de los resultados obtenidos la cual nos indica si se ha cumplido con los objetivos del análisis. En este caso no se cumplieron con los objetivos planeados debido a la confusión del algoritmo empleado(máxima verosimilitud) (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 8).

Se realiza la composición RGB de las bandas 7, 4, y 2 (composición en de las bandas 7, 4, y 2 del sensor TM, asignándolas; al rojo, verde y azul respectivamente), con la cual se llevara a cabo la fusión con la imagen SPOT Pancromática (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 5).

Una técnica muy utilizada, es la de fusionar imágenes de dos sensores distintos, para poder aprovechar las características de ambos.

Realización de la transformación RGB a HSI (Tono, Saturación e Intensidad)

Para realizar esta fusión se debe de contar con dos imágenes de la zona, con diferente resolución espacial (LANDSAT TM y SPOT P.).

Tomando la composición RGB de las bandas 7, 4 y 2, se realizará un remuestreo para tener el mismo número de líneas y columnas que tiene la imagen SPOT Pancromática de la zona, para su posterior fusión.

Una vez que se realiza el remuestreo, el archivo RGB se convertirá a HSI de la imagen LANDSAT TM.

Se ajusta el histograma de la imagen Pancromática al de Intensidad.

De la composición HSI se sustituirá la banda de Intensidad por el archivo de la imagen SPOT Pancromática cuyo histograma se iguala a la de la banda de Intensidad a sustituir; y se convertirá nuevamente a formato RGB. Esta nueva composición RGB tendrá las características espaciales de la imagen SPOT y las características radiométricas de la imagen LANDSAT TM (Ver figura 4).

Posteriormente se le aplicó un filtro direccional (laplaciano), este filtro se realizó para resaltar los rasgos lineales que están presentes en la imagen, en este tipo de matrices los coeficientes de filtraje se disponen de tal forma que refuerzan el contraste entre el pixel central y los pixeles vecinos (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 6).

La matriz utilizada fue la de análisis de gradiente, se recomienda para el realce de rasgos lineales en las ciudades.

$$\begin{array}{ccc} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{array}$$

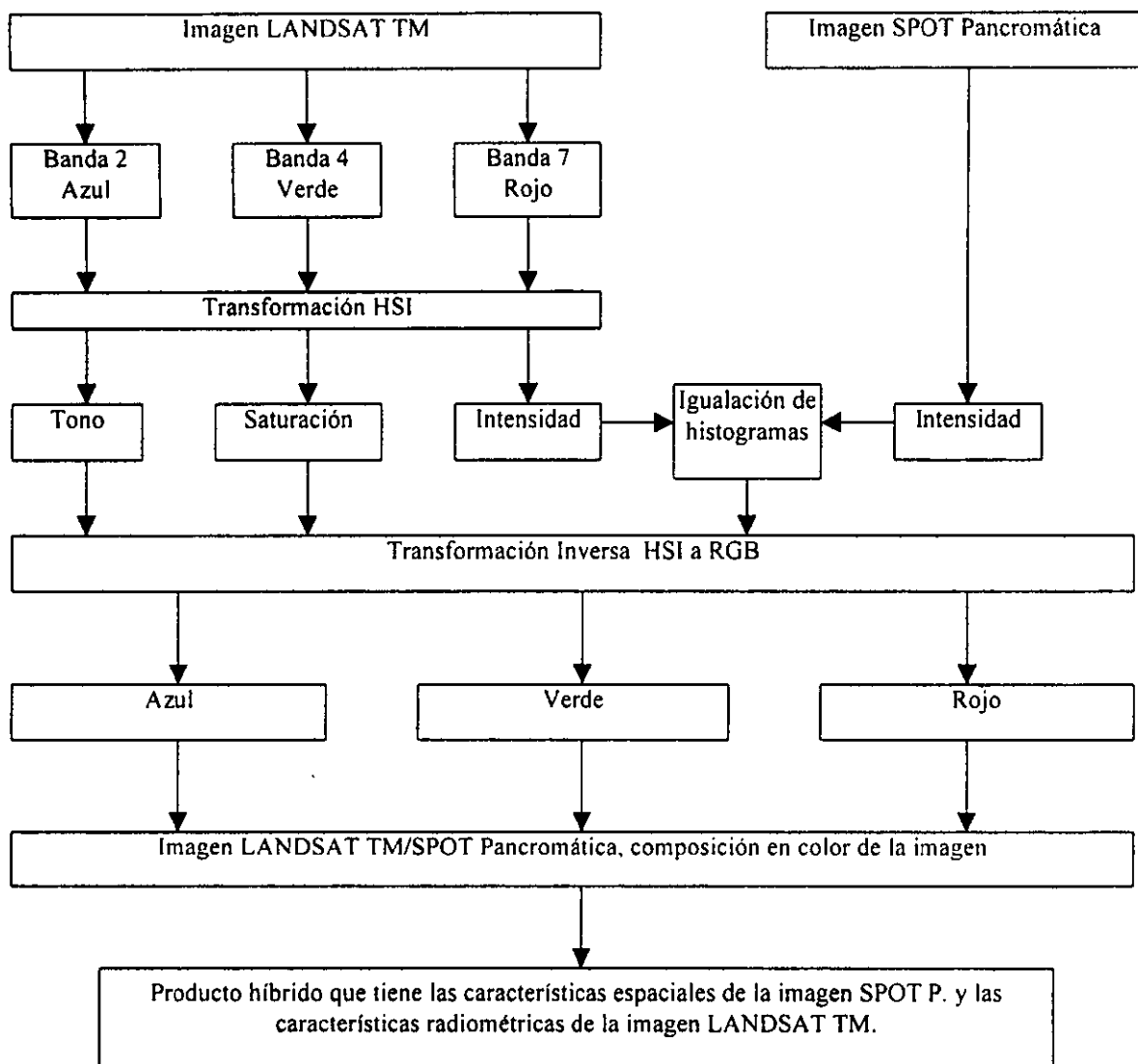


Figura 4.- Diagrama de la fusión de imágenes LANDSAT TM (30 m) y SPOT Panromática (10 m)

3.6.- Obtención de mapas preliminares y análisis de los mismos

3.6.1.- Mapa de Uso del Suelo

En la carta de uso de suelo se especifican las actividades actuales del terreno y su ocupación (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 7), nos muestra además la actividad agrícola empleada, la forma de riego, etc.

La carta de Uso del Suelo es elaborada con base a las técnicas de fotogrametría (sistema que se utiliza para medir y configurar la superficie terrestre a través del uso de fotografías aéreas) y actualmente por medio de imágenes de satélite (LANDSAT TM).

Descripción e importancia de la información contenida en la carta de Uso de Suelo

En términos generales, la información que esta contenida en la carta de uso del suelo, se refiere a los aspectos relacionados con la agricultura, con la vegetación en su estado natural y con los usos pecuario y forestal.

Para la elaboración de nuestro mapa de modificación de Uso del Suelo se tomaron como base algunas de las clasificaciones que se utilizan en la elaboración del mapa de Uso del Suelo y de Vegetación, escala 1: 50, 0000 que es elaborada por el INEGI (1970).

A continuación se describen los conceptos que están presentes en la zona de estudio y en cuyo análisis habrá de tenerse en cuenta los factores que han influido para incluirse.

Agricultura

Se incluyen bajo este rubro todos aquellos conceptos referentes al uso que el hombre da a los suelos al dedicarlos a actividades agrícolas. Esta clasificación se hace teniendo en cuenta primero, la disponibilidad del agua para los cultivos y considerando también, en caso de que fuera agricultura de temporal, permanente o nómada.

- *Agricultura de temporal (T).*- Se clasifica como tal a la agricultura de todos aquellos terrenos en donde el ciclo vegetativo de los cultivos que se siembran depende del agua de lluvias. Estas áreas pueden dejarse de sembrar algún tiempo, pero deberán estar dedicadas a esta actividad por lo menos el 80% de los años de un periodo dado.

- *Agricultura de Riego (R)*.- Se practica en aquellos terrenos en donde el ciclo vegetativo de los cultivos ésta asegurado totalmente mediante el agua de riego, por lo menos en un 80% de un periodo dado, por gravedad, bombeo, aspersión, goteo o por cualquier otra técnica.
- *Agricultura de Riego eventual (Re)*.- Se llama de riego eventual a todas aquellas áreas donde la irrigación durante el ciclo vegetativo del cultivo, no esta asegurada totalmente, como en el caso anterior, pero si es posible dar uno o más riegos.
- *Riego Suspendido ([R])*.- Esta denominación corresponde a las áreas en las cuales anteriormente se desarrollaba una agricultura de riego, pero que en la actualidad no es posible irrigar; esto sucede principalmente cuando ya no hay agua para hacerlo o bien, por la mala calidad del agua o de la acumulación de sales en el suelo, no permiten que la agricultura se siga desarrollando.

El siguiente concepto que se incluye, es referente al tipo de cultivo que se realiza y caerá dentro de algunos de los grupos que se mencionaron anteriormente.

- *Cultivos Anuales (A)*.- Son aquellos cultivos que permanecen en el terreno por un tiempo variable, pero no mayor de un año. Puede haber una rotación de cultivos en la misma área, o bien en el mismo año, sembrando dos cultivos en diferente época como por ejemplo: el cultivo primavera-verano y el cultivo otoño-invierno, o bien rotación a base de un año un cultivo y otro año otro cultivo. Como ejemplos de estos cultivos tenemos: maíz, frijol, trigo, etc.

Pastizales

Se incluyen bajo este concepto, aquellas áreas cuya vegetación fisonómicamente dominante es la graminoide, pudiendo estar asociada a otros tipos de vegetación. Los pastizales se clasifican, de acuerdo a su naturaleza en:

- *Pastizal natural (Pn)*.- Es aquel pastizal que se encuentra establecido en una región como producto natural de los efectos del clima, suelo y biota (condiciones ecológicas) de una región. Como ejemplo de este tipo de pastizales tenemos a los pastizales conocidos comúnmente en el norte del país como: zacate navajita (*Bouteloua gracilis*) o el zacate chino (*Bouchloe dactyloides*) y otros. Gran parte de la ganadería extensiva de los estados del norte del país como: Chihuahua, Durango, Zacatecas, Coahuila, etc., se desarrolla este tipo de pastizales.
- *Pastizal inducido (Pi)*.- Es aquel pastizal que surge cuando es eliminada la vegetación original que lo dominaba. Este pastizal puede aparecer como consecuencia de desmontes de cualquier tipo de vegetación; también puede establecerse en áreas agrícolas abandonadas o bien como producto de áreas que se incendian con frecuencia. Algunas de estas especies de gramíneas que se encuentran en estas condiciones son el zacate tres barbas (*Aristida adscensionis*), el zacate burro (*Paspalum notatum*), el zacate cadillo o roseta (*Cenchrus* .), etc.

Actualmente en nuestro país se han desarrollado importantes zonas ganaderas, en este tipo de pastizales.

Bosques

Vegetación arbórea, principalmente de las regiones de clima templado y semifrío con diferentes grados de humedad; por lo común con poca variación de especies y frecuentemente con pocos bejucos o sin ellos. Se considera que un bosque es natural cuando depende del clima y del suelo de una región, sin haber influido sensiblemente otros factores para su establecimiento.

Este tipo de vegetación se localiza principalmente en las zonas montañosas del país a lo largo de la Sierra Madre Occidental, la Oriental y el eje Neovolcánico.

- *Bosque mesófilo de montaña (BM).*- Vegetación arbórea densa que se localiza en laderas de montañas, barrancas, y otros sitios protegidos, tiene condiciones de humedad más favorables que los que tiene el resto de la vegetación que los rodea; generalmente se encuentra a altitudes entre los 800 y 2400 metros sobre el nivel del mar, es limitado por el bosque de pino y encino.
- *Bosque cultivado (BC).*- Es aquel que el hombre establece mediante plantaciones para diferentes fines; como por ejemplo; para detener la erosión, para la industria forestal, para ornato, etc.

Los principales grupos vegetales que se encuentran formando los bosques son: Oyamel, Cedro blanco, Carpinus, Eucalipto, Aile, Hilite ó Aliso, Enebro ó Táscate, Alamo, Liquidámbar, Pino, Encino, Pirul, Ahuehuate o Sabino, Casuarina, Sauce y Ayarín.

En México, los bosques de encino, pino y oyamel son los más abundantes y de mayor importancia económica.

Erosión.

Se llama así al desgaste del suelo causado por la acción del agua y el viento.

Nota: Después de aplicar la técnica seleccionada antes, se procede a elaborar mapas intermedios que nos permitan hacer un análisis de la zona en estudio y posteriormente obtener mapas finales. En donde estén representados los cambios derivados de la infraestructura terrestre y la expansión urbana.

3.6.2.- Mapa de Uso del Suelo con vías principales (1984)

Para la elaboración de este tipo de mapa se llevo a cabo una clasificación supervisada con la composición RGB de la imagen LANDAST TM de los tres primeros componentes

principales, según los resultados se aprecia, que en las tres primeras componentes principales explican el 96.98 % de la varianza total y por lo tanto podemos decir que en ella se guarda casi el 97 % de la información total de la escena, lo cuál es un aspecto de gran interés cuando se necesita reducir el número de bandas para disminuir el tiempo necesario para realizar una clasificación automática (ver tabla 1).

En la imagen final se pretendían representar la mayoría de las entidades que están presentes en la carta de Uso de Suelo del INEGI, pero debido a que no existen todas solo se hicieron algunos (*Pastizal cultivado, Pastizal inducido, Matorral, Bosque, Cuerpos de Agua y Suelo desnudo*), las áreas urbanas no se clasificaron debido a la confusión que presentan las distintas cubiertas presentes en la Ciudad de México.

La ilustración 8, muestra el resultado de la clasificación supervisada, en donde se aplicó el algoritmo de máxima verosimilitud, en ella se habían identificado seis clases espectrales, pero debido a que la ciudad de México se mezclan distintos tipos de cubiertas el método empleado presentó problemas y confundió las distintas cubiertas presentes en la zona, como consecuencia de esto los resultados no fueron muy satisfactorios (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 8).

3.6.3.- Mapa de Uso del Suelo con vías principales (1995)

La disponibilidad de contar con fotografías aéreas de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) nos indujo a trazar las vías principales para realizar la exploración del caso antes mencionado.

Con las fotografías aéreas digitalizadas y corregidas geométricamente, se hace la interpretación del uso de suelo de las distintas fechas que se utilizaron (Febrero 1984, vuelos de la DGG y Febrero 1994, vuelos SINFA), escala 1:75,000. Mediante la

comparación y el análisis de las fotografías aéreas tomadas con una diferencia de diez años, para nuestro caso, se identificó la transformación de uso de suelo en el área de estudio.

A partir de estas fotografías y de la imagen SPOT Pancromática de 1995, se llevo a cabo la digitalización de las vías principales de la zona en estudio para visualizar la posible área de afectación que se presenta con la construcción de nuevas vías de comunicación (Autopista México-Toluca, La Venta-Lechería, Carretera libre a Toluca, Av. Constituyentes, Anillo Periférico, etc.), (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 9).

3.6.4.- Análisis de los mapas preliminares

Muchas veces, y cada vez con mayor frecuencia, el análisis con imágenes tiene que ver mucho con los cambios en la superficie terrestre, debido a las características orbitales del satélite, pues permiten adquirir imágenes periódicamente, en condiciones similares, facilitando así cualquier estudio de dimensión temporal. Los estudios empleados con mayor frecuencia son; los cambios en el uso del suelo, en los porcentajes de erosión, en la cubierta vegetal, etc.

El análisis temporal resulta ser clave en la interpretación de las imágenes de satélite. Por lo tanto, se debe dividir las aplicaciones temporales en dos clases:

1. En estudios multianuales, que son empleados en la detección del cambio en el Uso del Suelo entre dos fechas diferentes. Con estos estudios se busca detectar los cambios entre dos fechas de referencia (distintos años, fechas iguales o muy cercanas). En general estos estudios son muy usados para detectar y cuantificar cambios dramáticos en la cubierta vegetal. Para realizar este tipo de estudios se utiliza comúnmente el CROSSING que es un proceso en donde se cruzan dos cubiertas diferentes.

2. En estudios multiestacionales. En donde es necesario emplear imágenes de distinta fecha (época de lluvias y época de secas), con esto se pretende enriquecer la información espectral de la zona.

En lo que respecta a los estudios multianuales, la mayor parte de la información digital en cada imagen se aborda por separado, para posteriormente detectar los cambios presentes en el uso del suelo, haciendo la comparación de las clasificaciones que se obtuvieron como resultado en las dos fechas diferentes.

Son mucho menos frecuentes aquellos estudios que clasifican en su conjunto, todas las bandas originales entre las distintas fechas.

Los métodos que se emplean en la detección de los cambios en el uso del suelo, suelen basarse en las siguientes técnicas:

1. Sustraer, pixel a pixel, los valores numéricos de cada pixel, de las dos imágenes originales, para posteriormente indicar las cubiertas de cambio entre las dos imágenes.
2. Realizar un cociente entre los mismos valores.
3. Aplicar la técnica de componentes principales, seleccionando los componentes menos principales, con esto se indican las áreas poco comunes entre ambas fechas.
4. Sustraer, pixel a pixel, las dos imágenes clasificadas.

En lo que se refiere a los estudios multiestacionales es mucho más frecuente que se combinen dos o más imágenes, como un paso previo a la clasificación. Pero esta combinación presenta problemas, debido a que se requiere hacer una combinación pixel a pixel, por eso es necesario que las imágenes presenten homogeneidad radiométrica y un ajuste geométrico.

Si se trabaja con dos imágenes que fueron adquiridas en distinta época, lo que nos van a presentar estas dos imágenes son condiciones de iluminación muy distintas, debido a la

altura del sol sobre el horizonte en las distintas épocas del año. También pueden producirse variaciones en la calibración de los sensores o en el efecto de la dispersión atmosférica.

Este tipo de problemas se solucionan mediante muestreos tomados sobre áreas poco afectadas por los cambios estacionales (aeropuertos, parcelas, suelos desnudos, o aguas profundas).

La exactitud geométrica resulta ser el factor más complejo. Se requiere que las dos imágenes a clasificar estén registradas con una elevada precisión. De lo contrario, el clasificador estará considerando un valor numérico de un pixel que no es propio de él, sino de alguno de los vecinos, con lo que la exactitud final resulta seriamente baja.

Es claro que este tipo de análisis, presenta muchas dificultades técnicas que hay que resolver para obtener resultados válidos.

Entre los principales están:

- El sensor debería ser el mismo o por lo menos muy similar. Esto implica que se tenga la misma resolución espacial y espectral, la misma geometría de visión y la hora del día.
- El registro geométrico entre las dos fechas debe ser exacto. De otra manera las diferencias detectadas sobre todo en las fronteras de los objetos, se debe a un mal registro, más que aun cambio real. Se estima que un cuarto o un medio de pixel será el requerido para la precisión.
- La cantidad de datos se incrementa y con ello los requerimientos de hardware y quizás también de software (más tiempo de procesos).
- Incremento en los costos. Es necesario trabajar con dos imágenes para hacer la comparación, con esto aumentan los costos.

Las fechas de las imágenes deben de escogerse con un criterio correcto. De nada sirve escoger fechas diferentes (muchas imágenes inservibles). De manera similar el número de bandas, lo relevante es la información aportada por cada fecha, no es el número de fechas distintas. Por otra parte se tiene el problema de que no siempre están disponibles las imágenes en las fechas requeridas por el proyecto.

En la composición RGB de los tres primeros componentes principales (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 1), se aprecian las diferentes tonalidades que están presentes en la área urbana de la zona en estudio, además de interpretarse muy bien las áreas de vegetación vigorosa sin que sean confundidos por la sombra orográfica. Pero con la imagen de la composición RGB 531 (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 2), se identifican las vías principales (Anillo Periférico, Carretera Libre a Toluca, etc.), y algunos rasgos de interés presentes en la zona en estudio.

La combinación de las bandas IVN 4 2, que esta constituida por el cociente de 7 y 3 de la imagen LANDSAT TM de la ciudad de México. El resultado de este cociente se ha reescalado propiamente para una mejor visualización. En esta nueva imagen se distinguen algunas cubiertas vegetales de difícil discriminación en las bandas originales, tal es el caso de los campos de golf y los parques en el interior del área urbana.

Una vez realizada la clasificación supervisada de la imagen TM en la cual los resultados no fueron los esperados debido a la confusión que tuvo el algoritmo empleado (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 4). Para la digitalización de las vías principales, se decidió que el proceso se hiciera directamente en pantalla, para lo cual nos apoyaríamos de todas composiciones hechas y evaluar cual combinación nos era mas útil para nuestro para nuestro interés.

Con la composición 3 2 1 se resaltan todos los rasgos en su color natural, esto es debido a que la imagen se hizo la combinación con los colores del visible. Los parques se observan en su color natural y se distinguen más las vías de comunicación (VER ANEXO,

ILUSTRACIÓN 10).

3.6.5.- Mapa de modificación de Uso de Suelo

En este caso como no nos sirvió la clasificación supervisada, se empleó el método del análisis analógico (sobreposición raster-vector) para trazar las posibles zonas de afectación de la zona a trabajar.

En la ilustración 11, se puede observar el resultado de la digitalización que se hizo directamente en pantalla, con este método si pudimos discriminar las diferentes áreas urbanas a clasificar, además de analizar otras clases de información, que a continuación se describen(VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 11):

- Urbano denso irregular
- Urbano con vegetación
- Urbano industrial
- Urbano denso
- Pastizal cultivado
- Pastizal inducido
- Planta de tratamiento de aguas residuales
- Centro de estudios superiores
- Cuerpo de agua
- Matorral

3.6.6.- Mapa de tipo de cambio del Uso del Suelo

Se elabora un mapa con la modificación del uso del suelo de 1970 a 1995, con la nueva vía existente (La Venta-Lechería), se trabaja con el sistema de información geográfico (SIG), ILWIS (ITC, 1992).

En esta etapa se fusiona la imagen LANDSAT TM y la imagen SPOT Pancromática en donde esta incluida la nueva vía (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 14), además de sobreponer a este resultado la máscara de las distintas áreas urbanas presentes en la zona por trabajar (CROSSING). Por último se elabora una imagen en donde este representada la degradación o regeneración que experimento la zona mediante la fusión de las dos imágenes (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 12), cabe comentar que solo se representaron algunas cubiertas en la leyenda pues no se hicieron las 52 cubiertas que nos dio como resultado en el crossing, debido a que se saturaría de información la leyenda.

CAPÍTULO IV.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados de los procesos digitales intermedios.

Durante el presente trabajo se obtuvieron diferentes resultados como:

El de análisis de componentes principales en donde se aprecia que los primeros tres componentes principales, contienen el 96.74% del total de la varianza original de la escena y por lo tanto podemos decir que en ellas se guarda casi el 97% de la información total, lo cual es un aspecto de interés cuando se necesita reducir el número de bandas para disminuir el tiempo necesario de procesos para realizar una clasificación digital automática.

En la tabla 1 se presenta la matriz de eigenvectores (vectores principales) de la escena estudiada (imagen LANDSAT TM).

	COMP. 1	COMP. 2	COMP. 3	COMP. 4	COMP. 5	COMP. 6
% VAR	73.89	17.91	5.18	2.14	0.79	0.10
B1	0.385	0.646	-0.086	-0.155	-0.598	-0.212
B2	0.238	0.273	-0.102	-0.006	0.141	0.916
B3	0.426	-0.312	-0.201	0.052	0.749	-0.341
B4	0.302	-0.320	-0.566	0.654	-0.238	-0.005
B5	0.696	-0.539	0.245	-0.400	-0.071	0.015
B7	0.192	0.129	0.749	0.621	-0.006	0.000

Tabla 1.- Eigenvectores correspondientes a los seis componentes principales de la escena

Como se observa en la tabla el primer componente principal presenta un alto contenido de información espectral en la banda del visible (B3) y la banda infrarroja (B5). El segundo componente revela una importante aportación de información en la banda del visible (B1) y

el tercero contiene información en su mayor parte en la banda que pertenece al infrarrojo térmico (B7).

De los compuestos en color preparados, la composición en color (RGB) de los tres primeros componentes principales (CP123); en donde al rojo se le asignó al primer componente, al verde el segundo componente y finalmente al azul el tercer componente. Esta composición RGB nos sirvió para poder identificar claramente la zona urbana y la zona conurbada de la Ciudad de México.

El Índice de Vegetación Normalizado (IVN) dio un excelente resultado, se logró una muy buena identificación de las áreas con cubierta vegetal (Bosques), sin que nos afectara la presencia de sombras (efecto por el relieve de la zona y toma de la imagen).

Una segunda composición RGB con el IVN anterior, la Banda 4 y la Banda 2 (IVN, 4, 2), se logró una magnífica presentación en pantalla; al compararla con la composición RGB normal 432, se observó un mayor realce en las áreas de vegetación y en los cuerpos de agua, al mismo tiempo que elimina el efecto de sombra por la topografía de la zona.

De la mezcla de los distintos sensores (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 14), un problema grave es la diferencia de fechas de las dos escenas. Además hay que tener en cuenta que en las imágenes SPOT los desplazamientos debidos al relieve, en terreno muy accidentado, pueden llegar a ser muy grandes si la toma ha sido oblicua. En estos casos se hace necesario corregirlos mediante un Modelo Digital de Elevación (MDE) del terreno y un algoritmo adecuado.

4.2.- Detección de los tipos de cambio en la zona de estudio

Con el fin de lograr mejores resultados, al realizar la clasificación supervisada, se agruparon los campos de entrenamiento, en donde se asignaron un total de 6 clases (VER ANEXO,

ILUSTRACIÓN 8), las cuales son:

1. Pastizal cultivado
2. Pastizal inducido
3. Matorral
4. Bosque
5. Cuerpo de agua
6. Suelo desnudo

Se pensaba obtener dos clases de cuerpos de agua; agua somera (bordos) y agua profunda (presas), esto es debido a la calidad y a la profundidad, como se trabajó con la imagen de satélite LANDSAT de la Ciudad de México, con el corte que se le realizó solo se observa un cuerpo de agua que es la presa el Madin, por lo tanto solo se clasificó como un cuerpo de agua en general independientemente de las características del agua, este tipo de separación se hace cuando existen muchas presas con diferente calidad de agua y se obtienen diferentes respuestas espectrales, para cada clase de agua (con esto se reduce la confusión espectral).

El bosque se referirá a la cubierta vegetal arbórea densa que se localiza en las laderas de las montañas, barrancas, y otros sitios protegidos, tiene condiciones de humedad favorables, generalmente se localiza entre los 800 y los 2400 metros sobre el nivel mar, es limitado por el bosque de pino y encino, lo cual podemos referir que el bosque presenta la mayor respuesta espectral en el Índice de Vegetación Normalizado, diferenciándolo con esto en el IVN con la agricultura, ya que presenta un patrón espectral diferente.

Se establecieron además algunos otros campos que no son necesarios para el estudio, ya que nos permitieron discriminar mejor las áreas de trabajo evitando las posibles confusiones con cubiertas de muy similar respuesta espectral.

Las áreas urbanas no fueron clasificadas, ya que presentan gran confusión al algoritmo empleado, esto se debe a que contienen en su interior diferentes elementos como; jardines,

pavimento, concreto, suelo, techos, etc, ocasionando una respuesta espectral de gran variabilidad que impide hacer correctamente su discriminación.

Los datos obtenidos directamente de la clasificación, por lo general requieren de procesos para ser útiles. Uno de los procesos más usados sería la reducción de la heterogeneidad espacial (efecto de sal y pimienta o confeti), y la eliminación de islas demasiado pequeñas para ser consideradas informativas a la escala de trabajo.

La clasificación supervisada de la imagen de la ciudad de México presenta un resultado bastante confuso, la principal explicación es el gran contraste espacial que existe en la zona, con múltiples fronteras y cambios de cobertura en espacios vecinos (fronteras), es por esto, que los resultados no fueron los esperados.

4.3 .- Elaboración y verificación de mapas finales

A partir de la carta de Uso del Suelo y Vegetación (INEGI, 1970) generada con fotografías aéreas en 1970, se digitalizaron en el SIG las unidades o rodales que nos servirán para hacer la comparación de Uso de Suelo de 1970 con respecto al obtenido con las clasificaciones digitales. Para estas unidades se crearon sus respectivos polígonos y leyendas para, posteriormente tener como resultado el mapa correspondiente de cada fecha.

4.3.1.- Elaboración de mapas finales

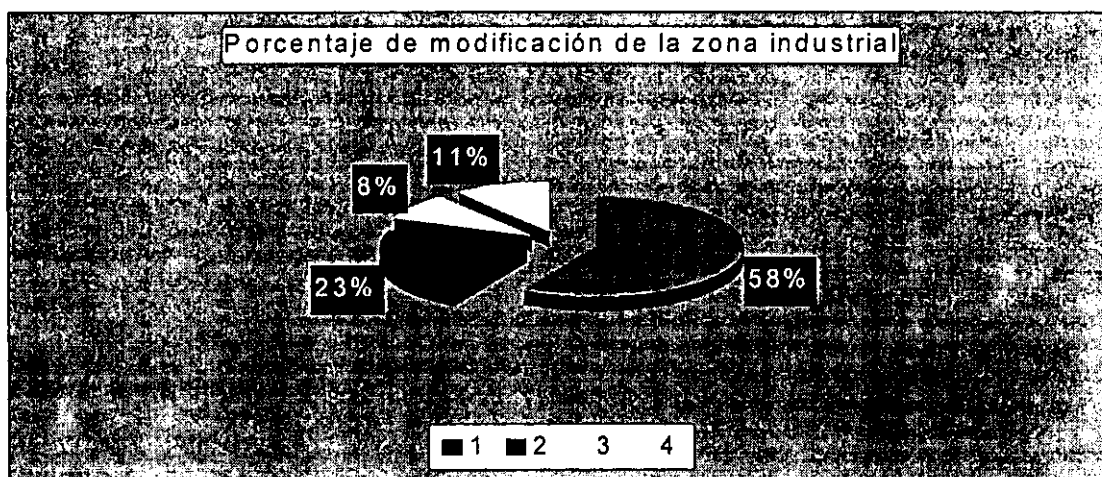
Para la elaboración de la carta de modificación del uso del suelo se emplean fotografías aéreas en blanco y negro, a escala 1:75, 000 de febrero de 1984 y febrero de 1994, del vuelo SINFA y las imágenes LANDSAT TM y SPOT Pancromática de la Ciudad de México, de Octubre de 1995. Procesos que se explican en los capítulos II y III.

4.3.2.- Verificación de mapas finales

Partiendo de la ilustración 13 y empleando las propiedades digitales, se pueden calcular los porcentajes de cambios de cada una de las cubiertas seleccionadas en el período de tiempo de 1970/95.

En las siguientes gráficas se muestra el porcentaje de modificación de uso de suelo de 1970, las cubiertas actuales presentaron cuatro modificaciones principales y son; regeneración, actualización, sin modificación y degradación. Estos porcentajes son el resultado de fusionar las dos imágenes (Crsossing). (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 13).

ZONA INDUSTRIAL



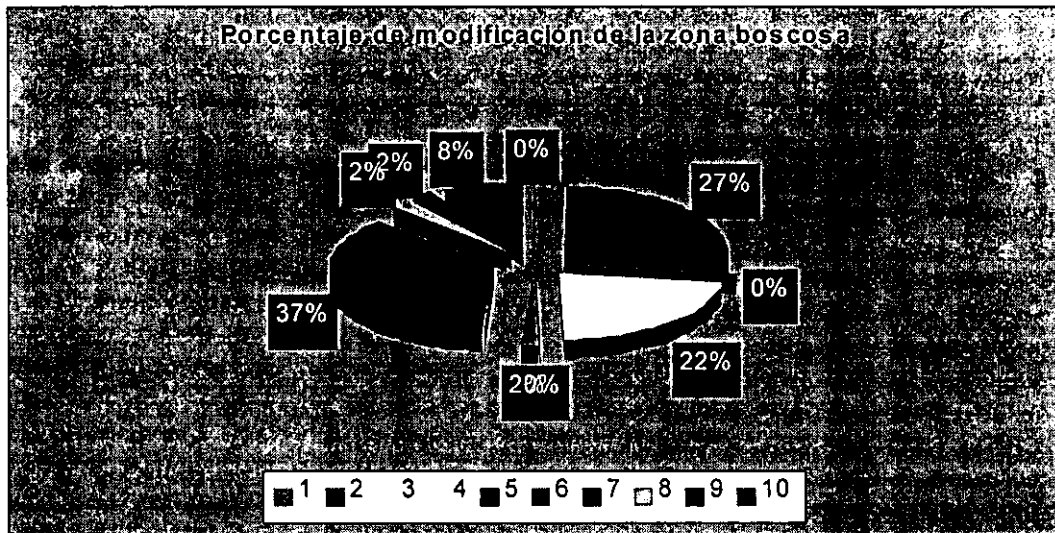
CUBIERTAS ACTUALES EN LAS QUE SE MODIFICÓ LA ZONA INDUSTRIAL

- 1 Urbano con vegetación (regeneración)
- 2 Pastizal inducido (regeneración)
- 3 Matorral (regeneración)
- 4 Urbano denso irregular (regeneración)

Como se observa en la gráfica anterior el 58% de la zona industrial paso a formar parte de la área urbana con vegetación, mientras que el 23% a pastizal inducido, otro 8% a matorral y por último el 11% paso a formar parte de la área urbana densa irregular, por lo tanto se puede decir que esta cubierta tuvo un 100% de regeneración en todas sus áreas.

Como resultado de la fusión de los dos mapas de uso de suelo se obtuvo que la zona industrial, presento una regeneración del 1.67% del total de la área estudiada, un ejemplo de esto es la zona de Santa Fe en donde anteriormente se encontraban las minas y actualmente es una zona residencial que se clasificó como zona urbana con vegetación, pero contrariamente en las zonas aledañas a Santa Fe, en las colonias populares hubo un cambio que se clasifico como área urbana densa. Por lo tanto se puede deducir que en la zona industrial no hubo una degradación de uso de suelo sino más bien una regeneración.

BOSQUE



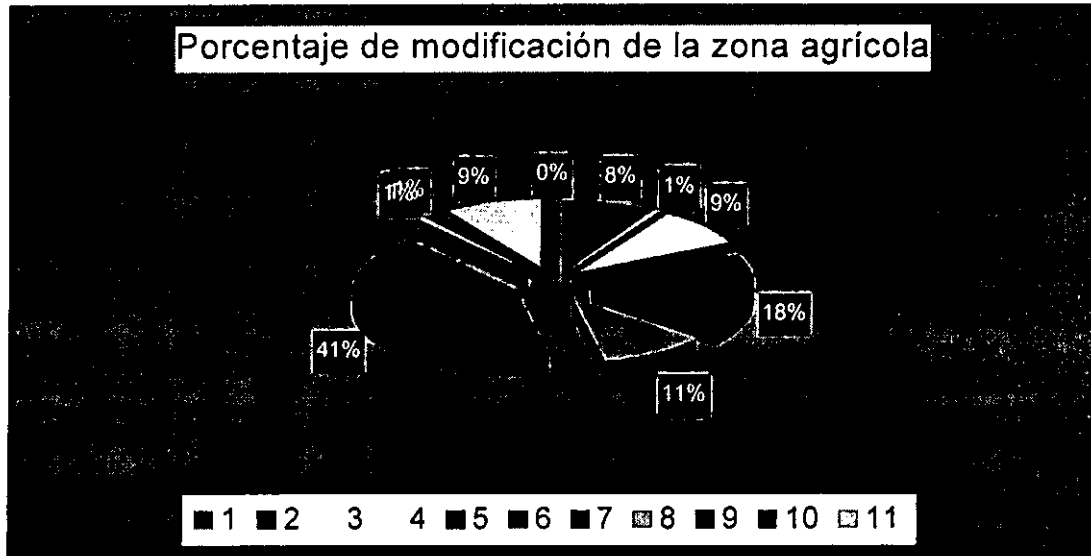
CUBIERTAS ACTUALES EN LAS QUE SE MODIFICÓ EL BOSQUE

- 1 Cuerpo de agua (actualización)
- 2 bosque (sin modificación)
- 3 Pastizal cultivado (degradación)
- 4 Urbano con vegetación (degradación)
- 5 Urbano industrial (degradación)
- 6 Urbano denso irregular (degradación)
- 7 Pastizal inducido (degradación)
- 8 Centro de estudios superiores (degradación)
- 9 Matorral (degradación)
- 10 Urbano denso (degradación)

La gráfica anterior muestra tres valores que tienen el 0%, este valor nos da debido a que el resultado es muy pequeño y el sistema lo considero con ese valor (presa el Madin por ejemplo). Además el 27% de toda la zona de bosque se mantuvo sin modificación, el 22% pasó a formar parte del área urbana con vegetación, otro 2% a urbano denso irregular, el 37% a pastizal inducido, 2% a centro de estudios superiores, otro 2% a matorral y por último el 8% a áreas urbanas densas, esta cubierta presento un mayor porcentaje de degradación.

Esta es una de las áreas que sufrió una fuerte degradación en la mayoría de las cubiertas en donde esta presente esta entidad, y fue del 14.7% del total de la superficie estudiada, cabe mencionar que en la carta de uso de suelo elaborada con métodos tradicionales en 1970, no clasificó la presa El Madin, por eso que se hizo una actualización de esta entidad que represento 0.07%, pero una parte no presento cambio, siguió conservandose como bosque que fue 5.37%.

AGRICULTURA



CUBIERTAS ACTUALES EN LAS QUE SE MODIFICÓ LA ZONA AGRÍCOLA

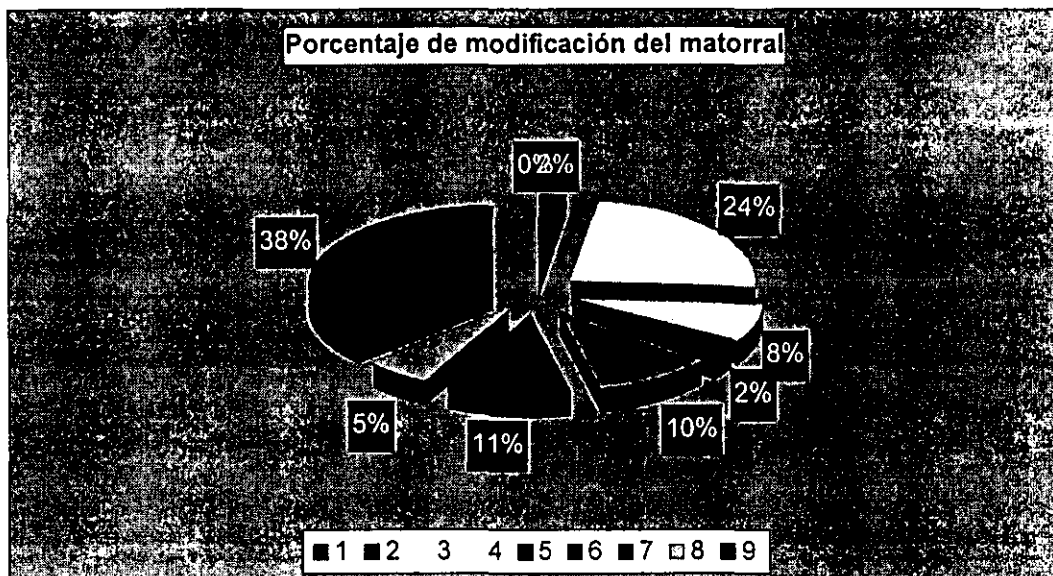
- 1 Cuerpo de agua (actualización)
- 2 bosque (regeneración)
- 3 Pastizal cultivado (degradación)
- 4 Urbano con vegetación (degradación)
- 5 Urbano industrial (degradación)
- 6 Urbano denso irregular (degradación)
- 7 Pastizal inducido (degradación)
- 8 Planta de tratamiento de aguas residuales (degradación)
- 9 Centro de estudios superiores (degradación)
- 10 Matorral (degradación)
- 11 Urbano denso (degradación)

En la zona agrícola se presentó también una cubierta con el 0% que corresponde a la presa el Madin, pero un 8% del total de la zona agrícola tuvo una pequeña regeneración a bosque, mientras un 1% a pastizal cultivado, el 9% a área urbana con vegetación, otro 18% a área

urbana industrial, 11% a urbano denso irregular, el 41% a pastizal inducido, un 1% a planta de tratamiento de aguas residuales, un 1% a centro de estudios superiores, otro 1% a matorral y por último un 9% a área urbana densa, esta es otra cubierta que su gran mayoría presento un alto porcentaje de degradación.

Esta es otra de las cubiertas (agrícola) que sufrió una fuerte degradación en la mayoría de las cubiertas y fue del 11.76%, solamente hubo pequeñas zonas que representan el 1% del total de la superficie estudiada en donde se presento una regeneración y un pequeño porcentaje de actualización, pero como es muy pequeña se desprecia. Como ejemplo de esto esta la parte poniente de la ciudad de México en donde se degrado a áreas urbanas con vegetación y en urbano denso, también se presento otro tipo de degradación en la zona norte, pues la gran mayoría de las zonas agrícolas se transformo en área urbano industrial, además se construyeron plantas para el tratamiento de aguas irregulares, y también esta la construcción de centros educativos como el IPN, pero existen también pequeñas zonas en donde la transformación no fue muy notoria a la escala de la imagen por eso no se considero.

MATORRAL



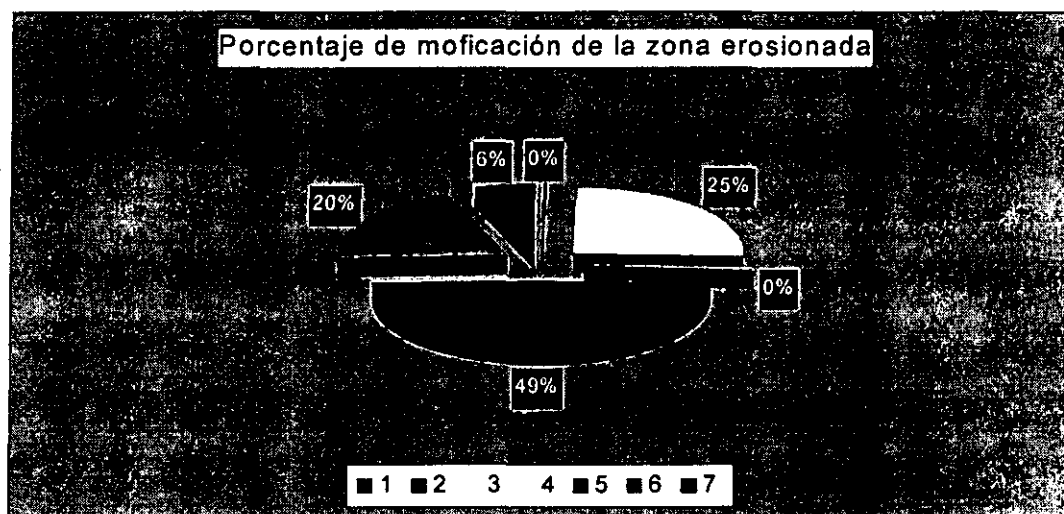
CUBIERTAS ACTUALES EN LAS QUE SE MODIFICÓ LA ZONA DE MATORRAL

- 1 Cuerpo de agua (actualización)
- 2 bosque (regeneración)
- 3 Urbano con vegetación (degradación)
- 4 Urbano industrial (degradación)
- 5 Urbano denso irregular (degradación)
- 6 Pastizal inducido (degradación)
- 7 Centro de estudios superiores (degradación)
- 8 Matorral (sin modificación)
- 9 Urbano denso (degradación)

Igual que en las dos anteriores cubiertas existe un valor del 0% (presa el Madin), es un valor significativamente muy bajo, es por eso que es considerado como 0% y fue la actualización de la presa el Madin, pero el 2% tuvo una regeneración a bosque, el 24% a área urbana con vegetación, 8% a urbana industrial, 2% a urbana densa irregular, el 10% a pastizal inducido, 11% a centro de estudios superiores, el 5% no presentó cambio alguno y 38% del total de la zona de matorral cambio a área urbana densa.

Como en el caso de todas las anteriores cubiertas la presa el Madin no existía y se actualizó, este porcentaje es muy pequeño y por eso lo despreciamos, también hubo un 0.08% de regeneración del matorral que se regeneraron y se adecuaron como áreas boscosas, además hubo un pequeño porcentaje del 0.19% que no presentó cambio, por lo que en este caso el matorral no sufrió ningún tipo de cambio, y por último hubo un bajo porcentaje de degradación en comparación con las demás áreas del 3.35%, existen algunos lugares en donde el matorral paso a ser parte de la zona urbana con vegetación como es el caso del pedregal, en la zona norte de la zona en estudio una muy pequeña área de matorral se transformo en zona urbana industrial, también en la parte sureste de CU en urbano denso irregular, pero en el caso de CU se transformo en centros educativos.

EROSIÓN



CUBIERTAS ACTUALES EN LAS QUE SE MODIFICÓ LA ZONA EROSIONADA

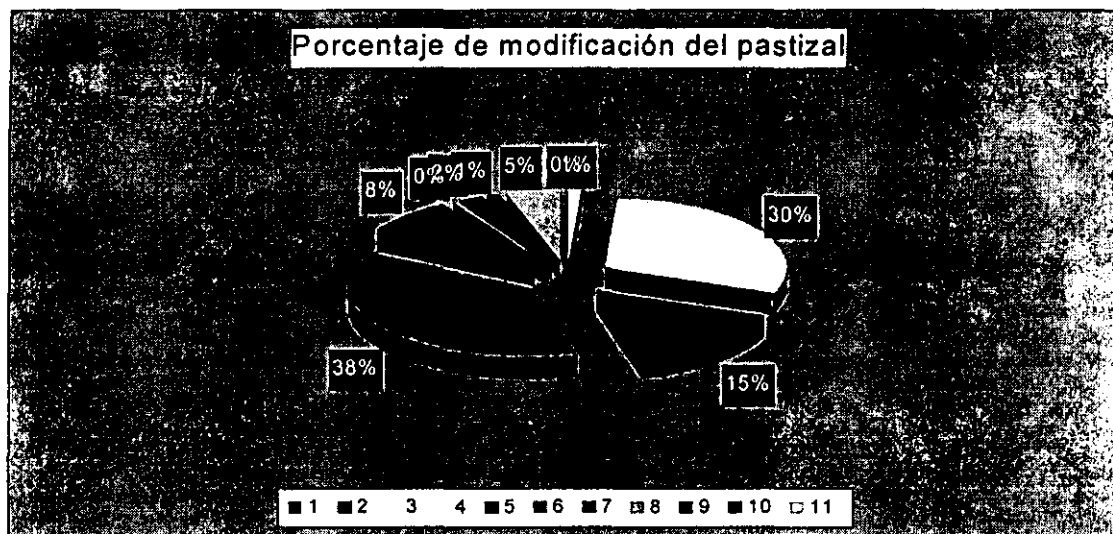
- 1 Cuerpo de agua (actualización)
- 2 bosque (regeneración)
- 3 Urbano con vegetación
- 4 Urbano industrial (regeneración)
- 5 Pastizal inducido (regeneración)
- 6 Matorral (regeneración)
- 7 Urbano denso (regeneración)

Son tres las cubiertas que presentan el 0% en la zona erosionada, esto es a que el valor es muy bajo y por eso la máquina lo definió como tal, pero el 25% presentó una regeneración, otro 49% cambio a áreas urbanas con vegetación, el 20% a pastizal inducido, y por último un 6% a matorral, esta cubierta al igual que la zona industrial presentó una gran regeneración.

Un caso contrario a las demás cubiertas presentes en la zona de estudio, es esta, una de las cubiertas en donde se presentó una regeneración mayor que fue del 3.25%, ya que la mayoría de las zonas erosionadas pasaron a formar parte del pastizal inducido, otra pequeña

parte se transformo en matorral, por último las áreas restantes se transformaron en áreas urbanas con vegetación, urbano industrial y urbano denso.

PASTIZAL



CUBIERTAS ACTUALES EN LAS QUE SE MODIFICÓ EL PASTIZAL

- 1 Cuerpo de agua (actualización)
- 2 bosque (regeneración)
- 3 Pastizal cultivado (sin modificación)
- 4 Urbano con vegetación (degradación)
- 5 Urbano industrial (degradación)
- 6 Urbano denso irregular (degradación)
- 7 Pastizal inducido (sin modificación)
- 8 Planta de tratamiento de aguas residuales (degradación)
- 9 Centro de estudios superiores (degradación)
- 10 Matorral (degradación)
- 11 Urbano denso (degradación)

Del área total de pastizales hay tres cubiertas con el 0% esto es por que el valor es pequeño, por lo tanto la máquina lo definió como el 0%, un 9% se conservo como pastizal (1% de pastizal cultivado y el 8% de pastizal inducido), el 30% a áreas urbanas con vegetación, 15% a áreas urbanas industriales, 38% a áreas urbanas densas irregulares, el 2% a centro de estudios superiores, un 1% a matorral y por último el 5% a áreas urbanas densas.

Como es una cubierta que anteriormente se le dio a la mayor parte de la carta ciudad de México (INEGI, escala 1: 50 000) por estética fue la que presento un mayor porcentaje de modificación de la zona estudiada.

Esta es una de las cubiertas en donde se presento una mayor confusión ya que en la carta de uso de suelo del INEGI la mayor parte de la ciudad de México venia clasificado como pastizal, esta clasificación se dio por una presentación estética de la carta de uso de suelo y vegetación. Al igual que las otras cubiertas un porcentaje del 0.44% tuvo una actualización, también un pequeña porción del 0.03% hubo una regeneración, hubo áreas que no presentaron cambios el porcentaje de esta área es del 5.38%, pero esta es una de las cubiertas en donde en porcentaje muy alto tuvo una degradación que fue del 53.04%, por lo tanto toda esta cubierta sufrió una degradación en la mayoría de las áreas a distintas cubiertas.

Con el resultado de este proceso se deduce que el 82.84% del total de la zona estudiada sufrió una degradación, un 10.76% no presento cambio alguno, el 0.32% sufrió una actualización y por último el 6.08% presento una regeneración.

Como consecuencia de estos datos estadísticos se observa que un alto porcentaje de las áreas presentes en la zona estudiada, presento una degradación, y por lo tanto el área en estudio sufrió una gran modificación de uso entre 1970 y 1995.

CAPÍTULO V.- CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

5.1. De la metodología.

El diseño metodológico cumplió el objetivo de estructurar una organización general para aplicaciones particulares. Por lo tanto la aplicación al estudio de caso cumple eficientemente los objetivos planteados, e induce al estudio de afectación vial sobre imágenes de Percepción Remota (PR), que por su costo debe formar parte de proyectos mas amplios donde ésta aplicación sea una sección de él.

A pesar de las limitaciones que existieron en la elaboración de este proyecto, los resultados son cualitativamente significativos, ponen de manifiesto la utilización de la Percepción Remota para profundizar en este tipo de estudios en diferentes situaciones, y poder establecer mecanismos de monitoreo en la modificación de uso de suelo a causa de la construcción de vías de comunicación.

5.2.- De los procesos digitales.

De los resultados y la experiencia adquirida se considera que es necesario tener presente que el tiempo empleado en la clasificación automática de una imagen aumenta con el número de bandas de la misma, especialmente si se usa el procedimiento de máxima probabilidad, por lo que es necesario estar seguro de que no se usarán más bandas de las necesarias, por lo tanto aquellas bandas que no ayuden a discriminar las clases espectrales de interés, debido a su baja contribución de la separabilidad de las mismas deberán eliminarse, esta eliminación debe hacerse de acuerdo a un criterio riguroso que permita valorar su utilidad. Un procedimiento usado frecuentemente consiste en determinar matemáticamente la reducción de bandas (componentes principales), en particular, la reducción de bandas de una imagen se realiza comprobando lo separadas que permanecen las clases cuando se eliminan algunas bandas de las mismas.

Las técnicas de clasificación supervisadas difieren mucho de las no supervisadas, puesto que las primeras intentan relacionar grupos de píxeles con coberturas reales de la superficie terrestre, con lo que se obtiene clases de información, mientras que las técnicas no supervisadas simplemente determinan grupos de píxeles que poseen valores similares en las bandas de la imagen, siendo estos grupos las clases espectrales.

Uno de los principales problemas que se detectaron durante el procesamiento digital de imágenes en uso urbano o semiurbano, para clasificar los diferentes tipos de cubiertas fue la confusión en las respuestas espectrales, que presenta la imagen LANDSAT TM, esto se debe principalmente a que están contenidos en su interior diferentes elementos como; jardines, pavimentos, campos de golf, etc., dando como resultado una respuesta espectral de gran variabilidad que nos impidió hacer correctamente la discriminación de las distintas cubiertas presentes en la escena. Esto es, objetos diferentes pueden poseer la misma o muy parecida respuesta espectral, y pasan a formar parte de la misma clase espectral; de igual manera un objeto puede tener un comportamiento espectral diverso, con lo cual una clase de información individual, puede corresponder a diferentes clases espectrales o puede darse el caso que el tamaño del píxel recoja las respuestas espectrales de diferentes cubiertas simultáneamente como sucede en su uso urbano. Lo anterior nos produce, finalmente, incertidumbre en los resultados obtenidos en la clasificación, ya sea no supervisada o supervisada.

A continuación se dan recomendaciones para la buena delimitación de los campos de entrenamiento:

- Separación de áreas homogéneas; la variabilidad dentro de una misma clase provocará confusiones en las estadísticas. Aunque hay que tener en cuenta que algunos rasgos de la superficie terrestre tienen mucha variación dentro de una misma área (áreas de bosques, cuerpos de agua, etc.).
- Fácil ubicación en el mapa y en la imagen

- Inclusión de clases fácilmente reconocibles aunque no sean de la materia de interés. Por ejemplo si tenemos la nieve de un volcán, crear la clase nieve, de otra manera esta última podría integrarse a una de las clases que sí deseamos obtener.
- No es relevante crear áreas muy grandes, ni muchas muestras, lo importante es la clara definición de cada una de ellas.
- La resolución espacial, menor tamaño de pixel, no necesariamente incrementa la calidad de la clasificación. La experiencia explica que a mayor resolución mayor variabilidad de un mismo objeto, y cuando este es muy heterogéneo (ciudades, por ejemplo) la heterogeneidad aumenta, es por eso que la mayoría de clasificaciones se hace con imágenes que tiene una resolución espacial mayor a 20 metros.

Es conveniente manejar una clase rechazo para los pixeles que no pueden ser agrupados en ninguna de las clases definidas.

A continuación se describen las principales fuentes de error que se presentan en una clasificación:

- La resolución espacial y radiométrica del sensor (forma de los objetos y contexto de los mismos).
- Una mala elección de los campos de entrenamiento.
- La elección de la leyenda (tratar de conservar en las clases temáticas, categorías espectrales muy confusas).
- Fecha de la imagen (inadecuada para diferenciar los objetos o cubiertas que deseamos separar).
- Las condiciones atmosféricas y ambientales de la zona (relieve y orientación).

El empleo de técnicas de análisis actuales (analógico y digital); como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la Percepción Remota (PR) son herramientas básicas que se deberían emplear en los programas de Desarrollo Urbano y Protección Ecológica, ya que estos permiten visualizar los cambios en uso de suelo casi de manera inmediata, para así

poder evaluar su evolución, también la base de datos capturada en formato digital permiten obtener una gran variedad de datos que se pueden manipular y actualizar en forma rápida y efectiva.

Se pretendió abarcar la misma zona con las dos imágenes (SPOT P y LANDSAT TM) pero debido a que el área que se obtuvo de la imagen TM después de hacer la corrección geométrica fue menor, por lo no se cubrió el área de trabajo con las dos imágenes, ya que la imagen SPOT abarcó más área que con la imagen TM, se puede concluir que no se pudo realizar el estudio de toda la zona sino más bien de una parte, por consiguiente para mejorar resultados es necesario que abarquen la misma zona las dos imágenes.

También pretendía abarcar las diferentes cubiertas que se encuentran incluidas en la cartografía temática (Uso de Suelo y Vegetación, INEGI) escala 1:50 000, que se pudieran clasificar en las imágenes. Pero debido a la confusión espectral que presentan las distintas cubiertas que existen en la zona en estudio, fue necesario subir de nivel de detalle para obtener mejores resultados.

Cabe comentar que muchos autores recomiendan trabajar con imágenes crudas y no con imágenes corregidas geométricamente, por lo tanto este proceso será el último paso de todo análisis digital, esto con el fin de no modificar los valores radiométricos originales de la escena, ya que con esta corrección se modifica la posición original del pixel, como consecuencia de esto los datos que se obtienen son falsos.

Como se dispuso de dos imágenes diferentes; SPOT Pancromática y LANDSAT TM de la zona, se hizo la fusión de las dos imágenes, con la transformación HSI. Como resultado de esta fusión se obtuvo un producto híbrido que tendrá las características espaciales de la imagen SPOT y las características radiométricas de la imagen LANDSAT TM. Con esto se pretende ilustrar la fusión de imágenes procedentes de sensores diferentes (VER ANEXO, ILUSTRACIÓN 14) y con ella se actualiza el trazo de la vía en estudio. Por lo tanto esta generación de productos híbridos nos permiten obtener mas detalle de la zona en estudio aprovechando con esto las propiedades de cada uno de los dos sensores por separado.

5.3.- De la aplicación al estudio de caso.

Con relación a la metodología adoptada, los resultados obtenidos parecen indicar que a través de estudios multitemporales donde se analizan las coberturas de uso de suelo, podemos establecer que el 82.84% de la zona estudiada sufrió una degradación; el 10.76% no presentó cambio alguno; el 0.32% sufrió una actualización (presa el Madín) y por último, el 6.08% del total del área presentó una regeneración (principalmente en la zona de Santa Fé).

Como consecuencia de esto, se puede decir que un alto porcentaje de las áreas presentes en la zona estudiada, presentaron una degradación, por lo tanto se puede decir que la zona en estudio presentó en la mayor parte una gran modificación de uso.

Con relación a los resultados, se pretendía realizar una verificación de campo esto con el fin de validar los resultados obtenidos en la clasificación, ya que no se puede considerar válido un trabajo de clasificación de imágenes si no se le ofrece al usuario del mapa final una estimación de la precisión obtenida. Aún siguen siendo pocos autores los que ofrecen esta información que debería ser, principalmente en la cartografía temática, obligatoria, sin importar si es derivada de imágenes o no, pero debido a la falta de tiempo no se llevó a cabo, por lo tanto el mapa que se obtuvo quedó en un plano teórico, con respecto a la precisión de los campos de entrenamiento y el algoritmo empleado.

Finalmente se emplearon diferentes técnicas para obtener resultados óptimos y satisfactorios, que sirvieron para la elaboración, documentación y evaluación de este proyecto de investigación, se contó con software de muy fácil manejo (ya que facilita el estudio y evolución de manera rápida y eficiente de la modificación de uso), por último espero que este trabajo a quien lo lea, le despierte interés; a quien lo consulte, le oriente y a quien lo estudie, le mueva a contribuir a su formación.

ANEXO



**ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO
DE LA AUTOPISTA LA VENTA-LECHERÍA
EMPLEANDO PERCEPCIÓN REMOTA**



SIMBOLOGIA

COMPOSICION EN FALSO COLOR

ROJO	CP1
VERDE	CP2
AZUL	CP3

Proyección UTM
Zona 14
Fuente:
Imagen Landsat TM
Path=26 Row=47
Octubre de 1991
Ciudad de México

TRABAJO DE TESIS
Ilustración 1
IMAGEN EN FALSO COLOR



**ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO
DE LA AUTOPISTA LA VENTA-LECHERÍA
EMPLEANDO PERCEPCIÓN REMOTA**



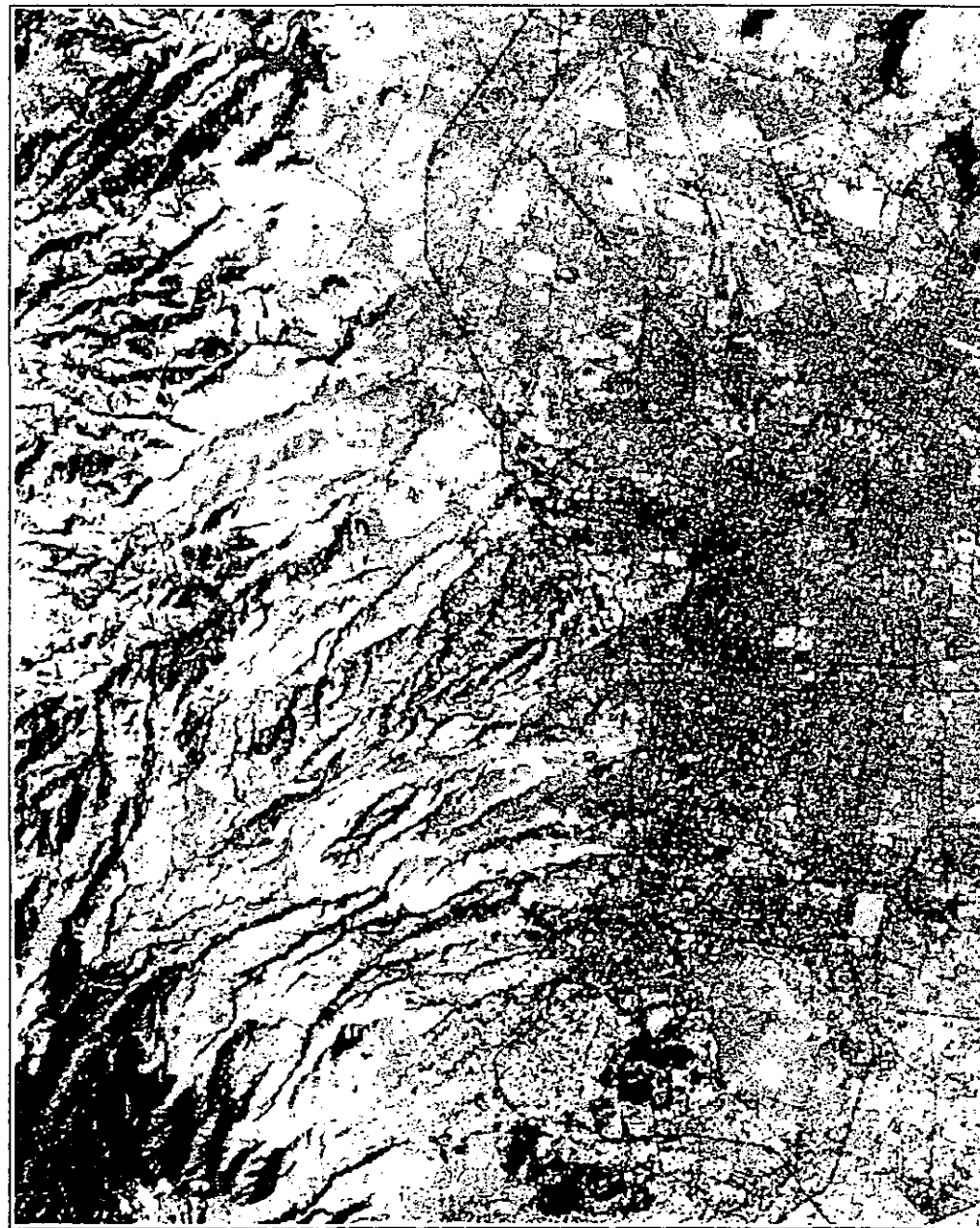
SIMBOLOGIA

COMPOSICION EN FALSO COLOR

ROJO BANDA 5
VERDE BANDA 3
AZUL BANDA 1

Proyección UTM
Zona 14
Fuente:
Imagen Landsat TM
Path=26 Row=47
Octubre de 1991
Ciudad de México

TRABAJO DE TESIS
Ilustración 2
IMAGEN EN FALSO COLOR



ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO
DE LA AUTOPISTA LA VENTA-LECHERÍA
EMPLANDO PERCEPCIÓN REMOTA



SIMBOLOGIA

COMPOSICION EN FALSO COLOR

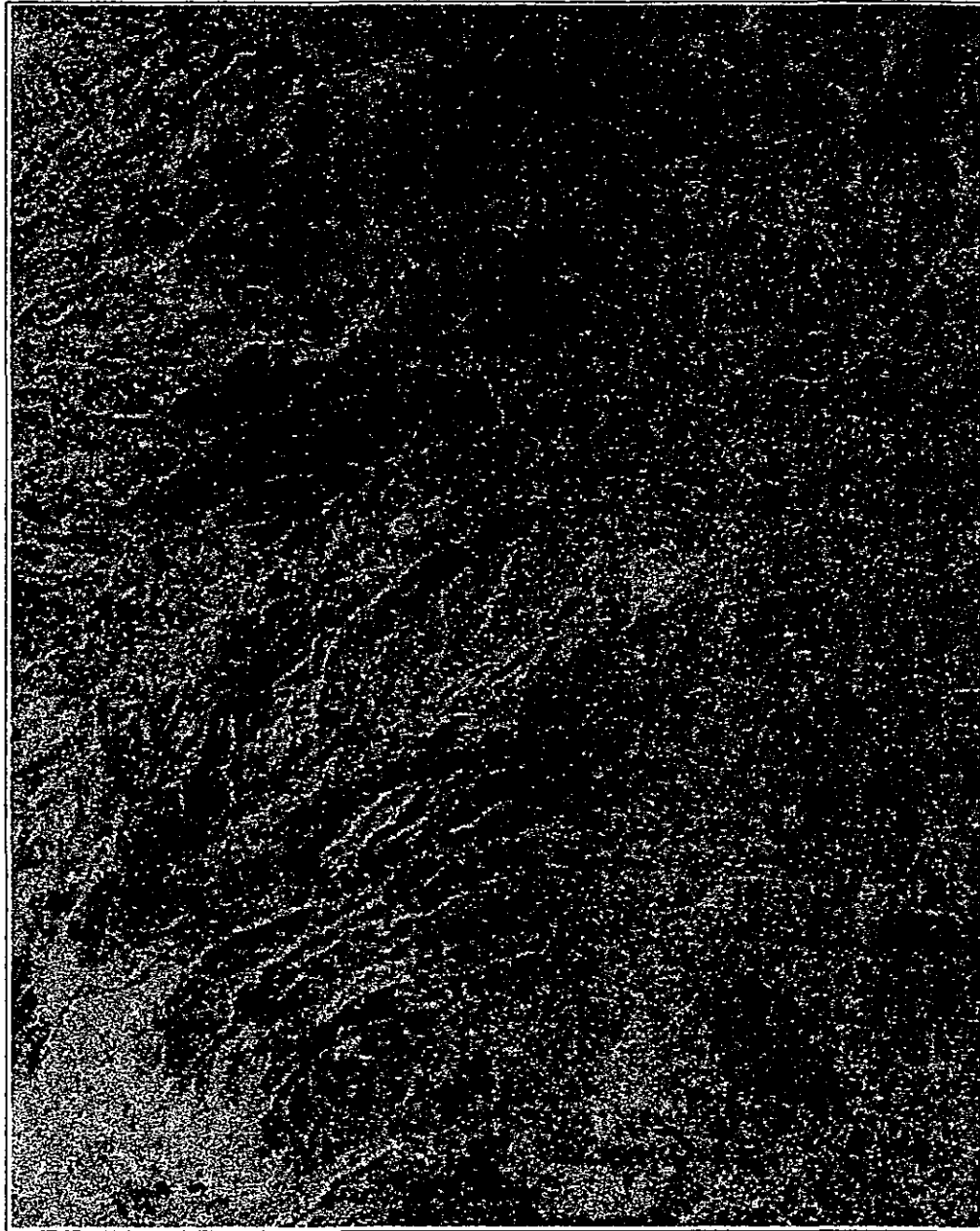
ROJO	IVN
VERDE	BANDA 4
AZUL	BANDA 2

Proyección UTM
Zona 14
Fuente:
Imagen Landsat TM
Path=26 Row=47
Octubre de 1991
Ciudad de México

TRABAJO DE TESIS

Ilustración 3

IMAGEN EN FALSO COLOR



**ANALISIS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO
DE LA AUTOPISTA LA VENTA-LECHERIA,
EMPLEANDO PERCEPCION REMOTA**



SIMBOLOGIA

**INDICE DE VEGETACION
NORMALIZADO (IVN)**

INFRAROJO BANDA7

ROJO BANDA3

**TRABAJO DE TESIS
Ilustración 4
INDICE DE VEGETACION
NORMALIZADO (IVN)**



ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO
DE LA AUTOPISTA LA VENTA-LECHERIA
EMPLEANDO PERCEPCIÓN REMOTA



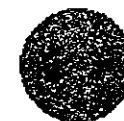
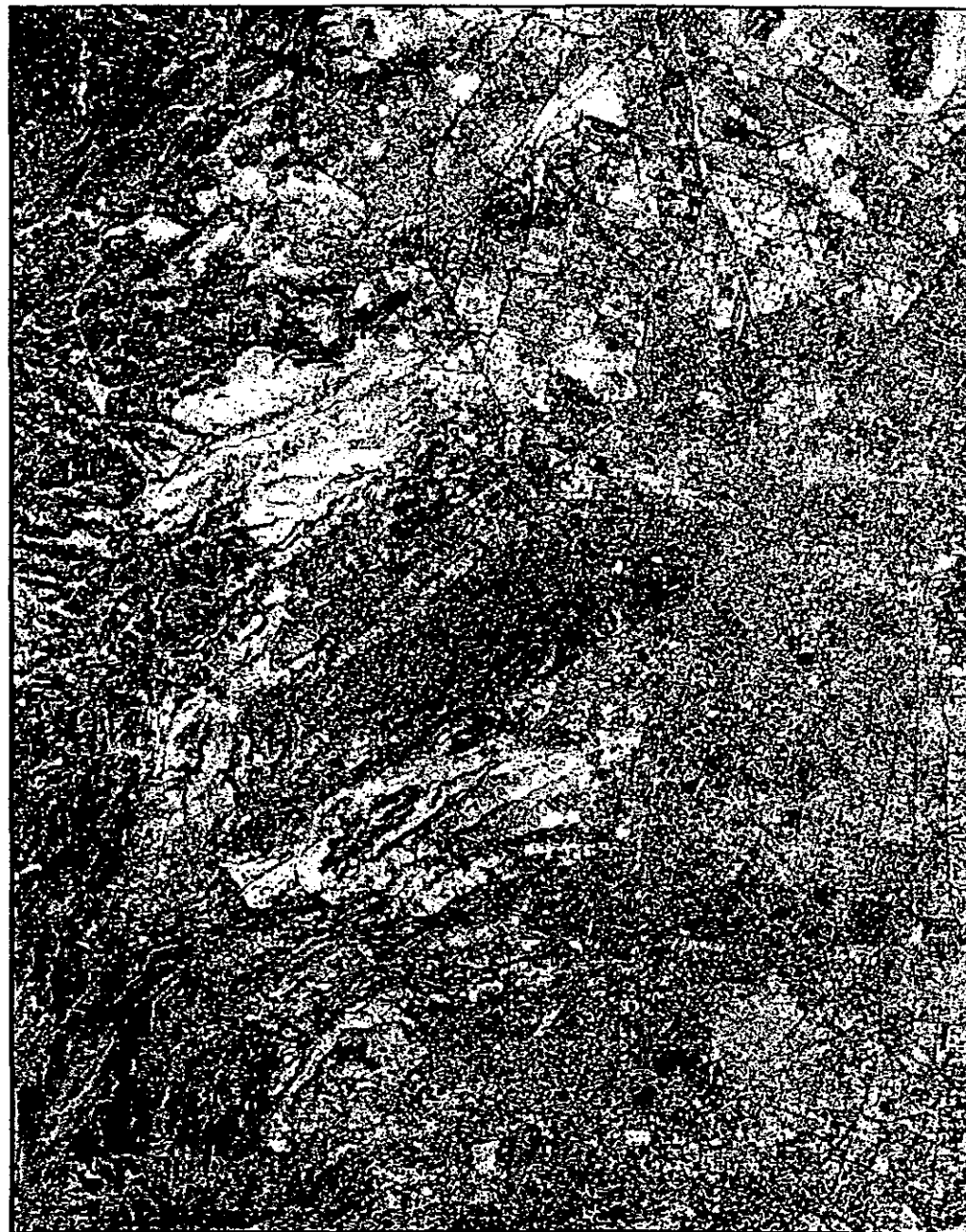
SIMBOLOGIA

COMPOSICION EN FALSO COLOR

ROJO	BANDA 7
VERDE	BANDA 4
AZUL	BANDA 2

Proyección UTM
Zona 14
Fuente:
Imagen Landsat TM
Path=26 Row=47
Octubre de 1991
Ciudad de México

TRABAJO DE TESIS
Ilustración 5
IMAGEN EN FALSO COLOR



SIMBOLOGIA

TRANSFORMACION HSI A RGB

INTENSIDAD	SPOT P.
SATURACION	B4
TONO	B2

Proyección UTM
Zona 14
Fuente:
Imagen Landsat TM
Path=26 Row=47
Octubre de 1991
Ciudad de México
Imagen Spot P(1995)

TRABAJO DE TESIS

Ilustración 6

TRANSFORMACION RGB A HSI

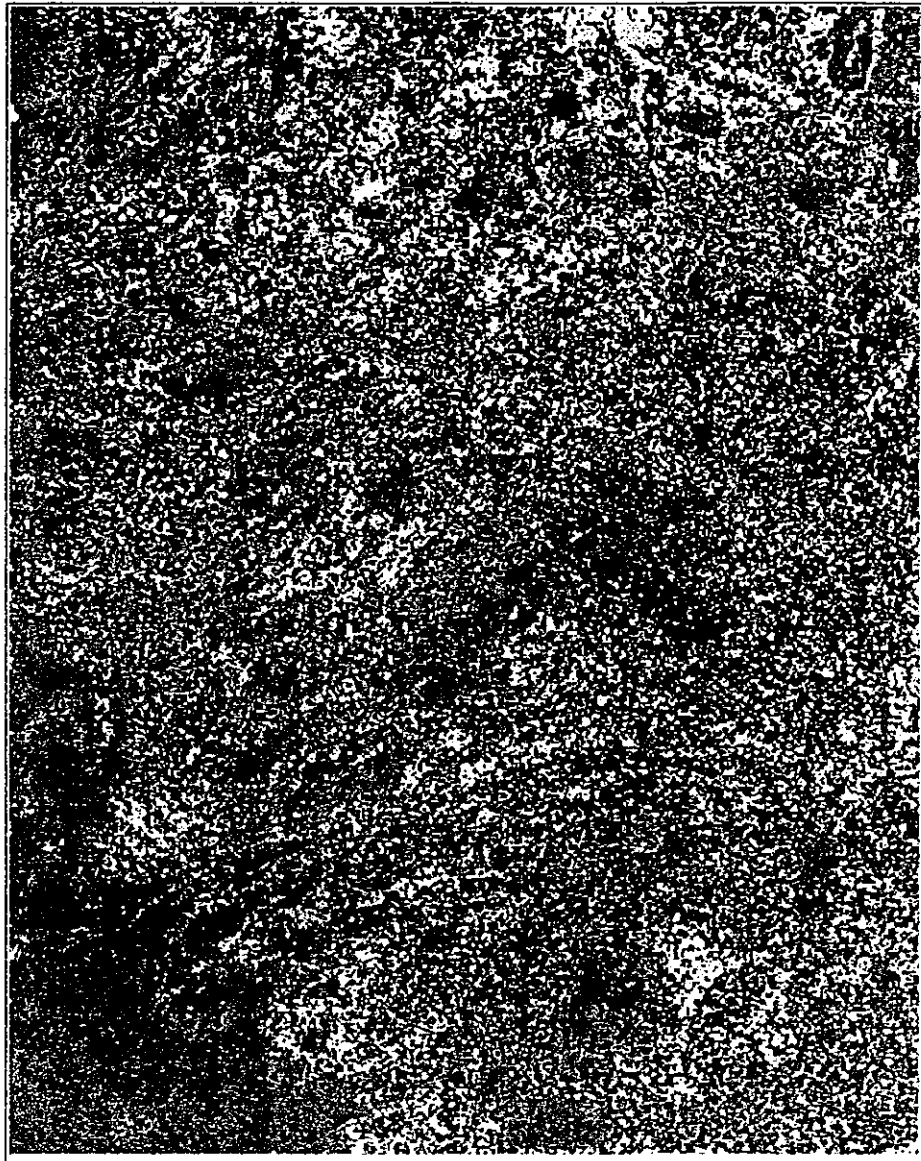


ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO
DE LA ZONA EST. LA VENTA-LECHERIA
ENLELANDO PERCEPCIÓN REMOTA



-  AGRICULTURA
-  BOSQUE
-  PASTIZAL
-  ZONA INDUSTRIAL
-  MATORRAL
-  EROSION

TRABAJO DE TESIS
Ilustración 7
USO DE SUELO (DETENAL); INEGI.

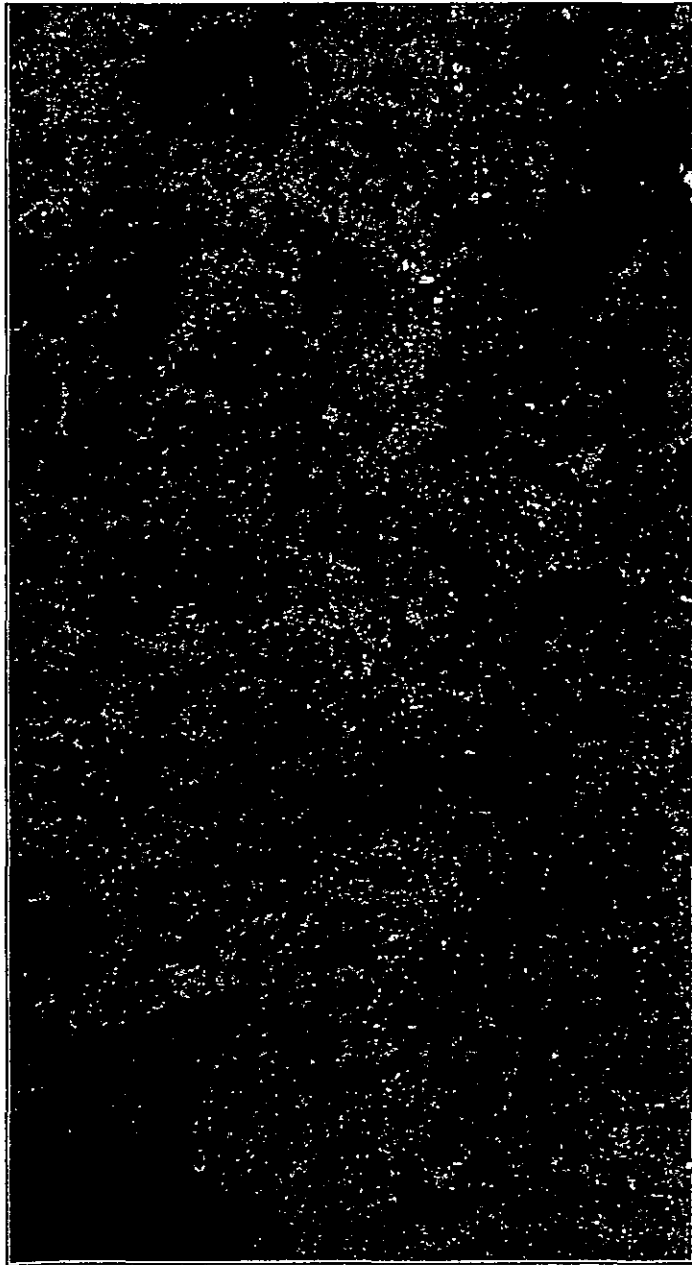


INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
DE LA UNIVERSIDAD DEL ZULIA
SISTEMA NACIONAL DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



- BOSQUE
- MATORRAL
- PASTIZAL CULTIVADO
- PASTIZAL INDUCIDO
- CUERPO DE AGUA
- SUELO DESNUDO

TRABAJO DE TESIS
Ilustración 8
CLASIFICACION SUPERVISADA



**ANALISIS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO
DE LA AUTOPISTA LA VENTA-LECHERIA,
EMPLEANDO PERCEPCION REMOTA**



- 1.- AUTOPISTA LA VENTA-LECHERIA
- 2.- PERIFERICO
- 3.- AUTOPISTA MEXICO-QUERETARO
- 4.- AUTOPISTA MEXICO-TOLUCA
- 5.- CARR. LIBRE MEXICO-TOLUCA
- 6.- CARR. A LAGO GUADALUPE
- 7.- BLVR. ZARAGOZA
- 8.- BLVR. ADOLFO LOPEZ MATEOS
- 9.- AV. RUIZ CORTINEZ
- 10.- VIA DR JORGE JIMENEZ CANTU
- 11.- ENTRONQUE LOMAS VERDES
- 12.- AV. SAN MATEO NOPALA
- 13.- BLVR. LUIS DONALDO COLOSIO
- 14.- CARR MEXICO-HUIXQUILUCAN
- 15.- PASEO DE LA REFORMA
- 16.- CONSTITUYENTES
- 17.- OBSERVATORIO
- 18.- AV. LAS TORRES
- 19.- CAMINO A STA.FE
- 20.- CALZADA LAS AGUILAS

TRABAJO DE TESIS

Ilustración 9

**VIAS PRINCIPALES DE
LA ZONA EN ESTUDIO**



**ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO
DE LA AUTOPISTA LA VENTA-LECHERÍA
EMPLEANDO PERCEPCIÓN REMOTA**



SIMBOLOGIA

COMPOSICION EN FALSO COLOR

ROJO	B3
VERDE	B2
AZUL	B1

Proyección UTM
Zona 14
Fuente:
Imagen Landsat TM
Path=26 Row=47
Octubre de 1991
Ciudad de México

TRABAJO DE TESIS
Ilustración 10
IMAGEN EN FALSO COLOR

**ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO
DE LA AUTOPISTA LA VENTA LECHERÍA,
EMPLEANDO PERCEPCIÓN REMOTA**



- URBANO INDUSTRIAL
- URBANO DENSO IRREGULAR
- URBANO DENSO
- ▨ URBANO CON VEGETACION
- ▩ PASTIZAL CULTIVADO
- PASTIZAL INDUCIDO
- ▩ CENTRO DE ESTUDIOS SUPERIORES
- PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA
- MATORRAL
- CUERPO DE AGUA
- BOSQUE

TRABAJO DE TESIS
Ilustración 11
MAPA DE USO DE SUELO

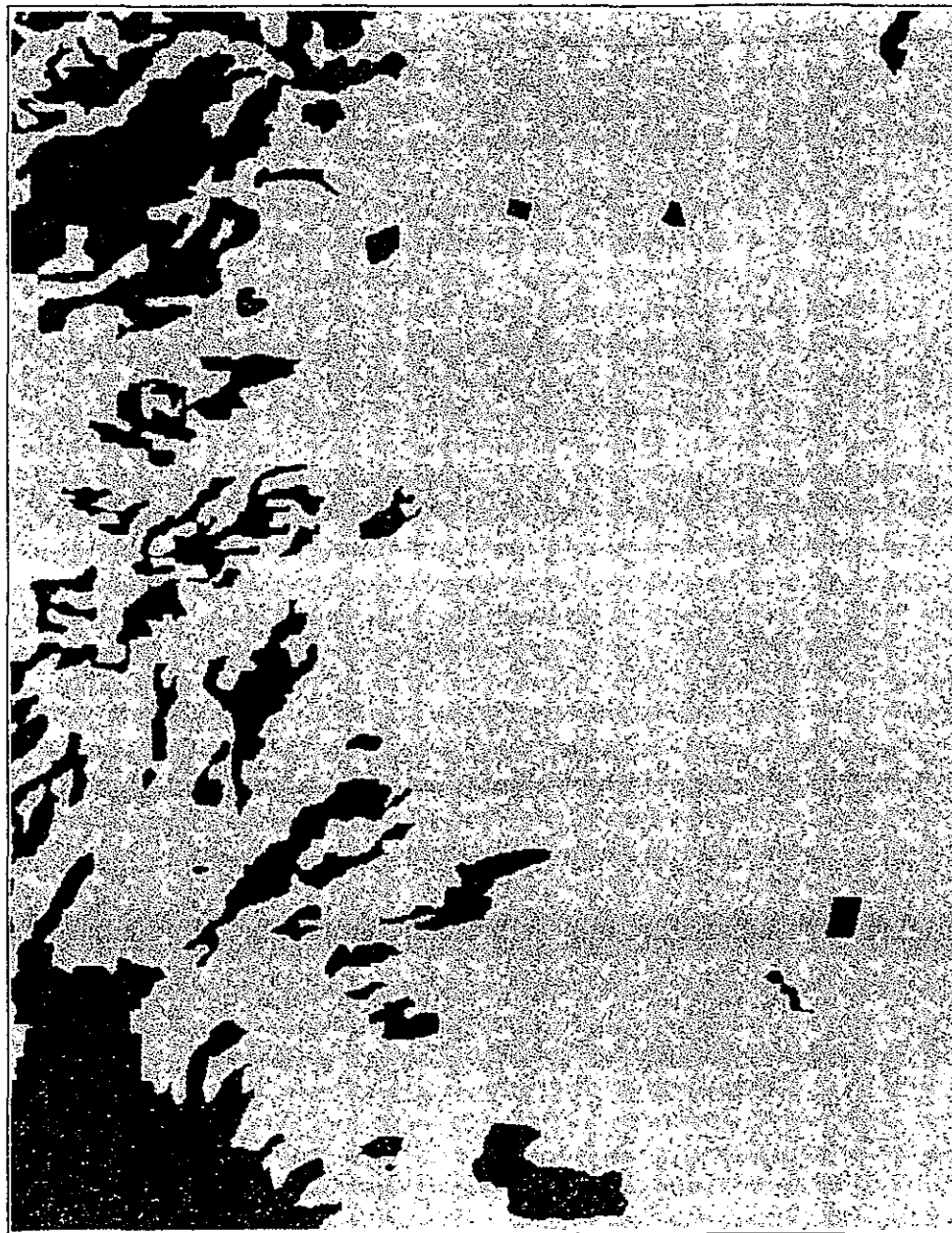


**ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO
DE LA AUTOPISTA LA VENTA-LECHERIA
EMPLEANDO PERCEPCIÓN REMOTA**



- BOSQUE (NO HUBO MODIFICACION)
- URBANO CON VEGETACION (DEGRADACION)
- PASTIZAL INDUCIDO (DEGRADACION)
- URBANO CON VEGETACION (DEGRADACION)
- URBANO INDUSTRIAL (DEGRADACION)
- PASTIZAL INDUCIDO (DEGRADACION)
- URBANO CON VEGETACION (DEGRADACION)
- URBANO DENSO IRREGULAR (DEGRADACION)
- PASTIZAL INDUCIDO (NO HUBO MODIFICACION)
- URBANO DENSO (DEGRADACION)

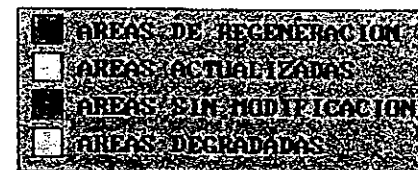
TRABAJO DE TESIS
Ilustración 12
CROSSING DE LOS DOS MAPAS



ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO
DE LA AUTOPISTA LA VENTA-TECHERÍA
ENTRE 1980-1985 PERCEPCIÓN REMOTA



TIPO DE CAMBIO



TRABAJO DE TESIS
Ilustración 13
ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA
ZONA PONIENTE DE LA CD. DE MEXICO



COMBINACION 21208 LA TIPOLOGIA LANDSYSTEM TIENEN DINDRE AD SE
LA MURVA UTA LA UENTA DISCRET

PROFICU HERRERO GEOLOGO TRANSFORMACION GEOLOGICA EN
DONDE SE OBSERVA LA MURVA UTA LA UENTA DISCRET

BIBLIOGRAFIA (REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS).

Arozarena, A., (1995), TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES. Curso Internacional para el Tratamiento Digital de Imágenes de Satélite con Aplicaciones Cartográficas, Organiza: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) y Instituto Geográfico Nacional (IGN; España), Junio - Julio de 1994, Aguascalientes, Ags. México.

Antún, J. P., y Santos, C., (1994), EXPLORACIÓN DE LA EVALUACIÓN DEL USO DEL SUELO EN LA TRAZA PROPUESTA DEL LIBRAMIENTO NORTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO. Presentado en al V Reunión Nacinal SELPER, La Paz, BCS (México).

Bosque, J., (1992), SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG). Editorial Rialp, S.A. Madrid, España.

Chuvioco, E., (1990), FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL. Editorial Rialp, S.A. Madrid, España.

García, H., y Coautores (1987), ATLAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO. Departamento del Distrito Federal (D.D.F), Secretaria General de Desarrollo Social. El Colegio de México, Centro de Estudios Demográficos y de Desarrollo Urbano. México, D.F.

García, J., (1994), LA PERCEPCIÓN REMOTA Y EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES EN LA GESTIÓN INFORMÁTICA PARA LA PLANEACIÓN. Tesis de Maestría en Planeación, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.

Guernier-Puech, J., (1996), PROGRAMA DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA DEL CNS (*Centro Nacional de Estudios Espaciales Agencia Francesa del Espacio*). Boletín SELPER-MÉXICO, No. 34, Mayo de 1996.

IBM y INEGI, (1995), MANUAL DEL SPIPR (SISTEMA PERSONAL INTERACTIVO EN PERCEPCIÓN REMOTA. Versión 2.0, Aguascalientes, Ags.

ILWIS: The Integrated Land and Water Information System, (1992), ILWIS 1.3 USER'S MANUAL. ITC (International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, May, 1992.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, (1994), NOCIONES ELEMENTALES DE FOTOGRAFÍA AÉREA, PARA SU APLICACIÓN EN CONTROL DE CALIDAD CARTOGRAFICO. Manual del INEGI, Aguascalientes, Ags.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, (1990), GUÍA PARA LA INTERPRETACIÓN DE CARTOGRAFÍA "USO DE SUELO". Manual del INEGI, Aguascalientes, Ags.

Lillesand, T, and Kiefer, R, REMOTE SENSING AND IMAGE INTERPRETATION. Second Edition. John Willey & Sons. New York, USA.

Lira, J., (1994), ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES Y PERCEPCIÓN REMOTA. GEO-UNAM (Boletín informativo del área de Ciencias de la Tierra), UNAM, México, D.F.
Mather, P., M., (1991), COMPUTER PROCESSING OF REMOTELY-SENSED IMAGES AN INTRODUCTION. John Willey & Sons. Great Britain.

Kohei, Ch., Hiroshi, K., Mitsunari, Y., (1990), PERSONAL COMPUTER BASED IMAGE INTERPRETATION USING SPOT IMAGE AND CONVENTIONAL LAND USE INFORMATION. Symposium on Cartographic and data base applications of Photogrametry and Remote Sensing, Tsukuba, Japan.

Palacio, J. L., y Luna, L., (1994), CLASIFICACIÓN ESPECTRAL AUTOMÁTICA vs. CLASIFICACIÓN VISUAL: Un ejemplo al sur de la Ciudad de México. Boletín de Instituto de Geografía No.29, UNAM, México, D.F.

Santos, C., (1992), INTERACCIÓN ENTRE EL TRANSPORTE Y LA EXPANSIÓN URBANA IRREGULAR. Tesis de Maestría en Planeación, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.

Santos, C., y Antún, J., P., (1994), EXPLORACIÓN DE LA EVALUACIÓN DEL USO DEL SUELO EN LA TRAZA PROPUESTA DEL LIBRAMIENTO NORTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO. Presentado en la V reunión nacional SELPER, La Paz, B.C.S.

Sanvicente, H., (1996), SISTEMA PARA LA EVALUACIÓN DE RECURSOS NATURALES MEDIANTE IMÁGENES DE SATELITE. Tesis de Maestría en Ingeniería, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.

Schowengerdt, R., A., (1988), TECHNIQUES FOR IMAGE PROCESSING AND CLASSIFICATION IN REMOTE SENSING. Academic press, inc. Orlando, Florida.

Shoji, T. and Tsuyoshi T., (1990), EXTRACTION OF LANDUSE CHANGE BY INTERPRETATION OF SATELLITE IMAGE COMBINED WITH TOPOGRAPHICAL MAP. Symposium on Cartographic and data base applications of Photogrametry and Remote Sensing, Tsukuba, Japan.

SPOT: Systeme d' Observation de la Terre , (1995), SPOT IMAGE SUR INTERNET, en SPOT Magazine No. 24, Toulouse, Francia.

Vivas, P., (1994), DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE IMÁGENES. Curso Internacional para el Tratamiento Digital de Imágenes de Satélite con Aplicaciones Cartográficas, Organiza: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) y Instituto Geográfico Nacional (IGN; España), Junio - Julio de 1994, Aguascalientes, Ags. México.